

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM



\$5,524*

Осциллограф
смешанных
сигналов 54622D



\$9,998*

Осциллограф
серии Infinium



\$1,435*

Система сбора
данных и
коммутации 34970A



\$1,106*

Цифровой
мультиметр
34401A



\$1,994*

Генератор
функций 33120A



\$3,575*

Логический
анализатор
LogicWave E9340A



\$1,201*

Источник питания
E3631A

* - цены без НДС
и таможенных налогов



Мы знаем и других людей, которые не располагают
лишним временем для поиска необходимых
инструментов

Вы знаете, насколько утомительным может быть поиск нужного прибора. Это
знает и Agilent Technologies. Поэтому мы провели специальные исследования во
всем мире. Перед тем, как разрабатывать приборы. И сейчас мы предлагаем
Вам целое семейство высококачественных приборов универсального
назначения. Теперь Вы можете приобрести приборы с той производительностью
и возможностями, которых ищете.

Между тем, мы всегда сможем предоставить интересующую Вас информацию,
когда Вам необходимо. Технические характеристики, информацию по
применению и цены. Обратитесь в наше представительство или посетите наш
сайт в сети Internet. Или позвоните нашему инженеру. Чтобы быть полностью
уверенным, что Вы получаете те возможности и ту производительность, которые
Вам необходимы. А в оставшееся время Вы сможете полностью
сконцентрироваться на решении вашей инженерной задачи.

www.agilent.com/find/bi



Agilent Technologies

Российское представительство Agilent Technologies

(095) 797 3963, 797 3900

tmo_russia@agilent.com

Инженера-метролога

Карманный
справочник

У. Болтон

Newnes

Карманный справочник Инженера- метролога



ISBN 5-94120-040-4



9785941 200405

ОДЭКА

Карманный справочник
ИНЖЕНЕРА-МЕТРОЛОГА



МОСКВА
Издательский дом «Додэка-XXI»
2002

W . B o l t o n

N e w n e s

Instrumentation & Measurement

P o c k e t B o o k

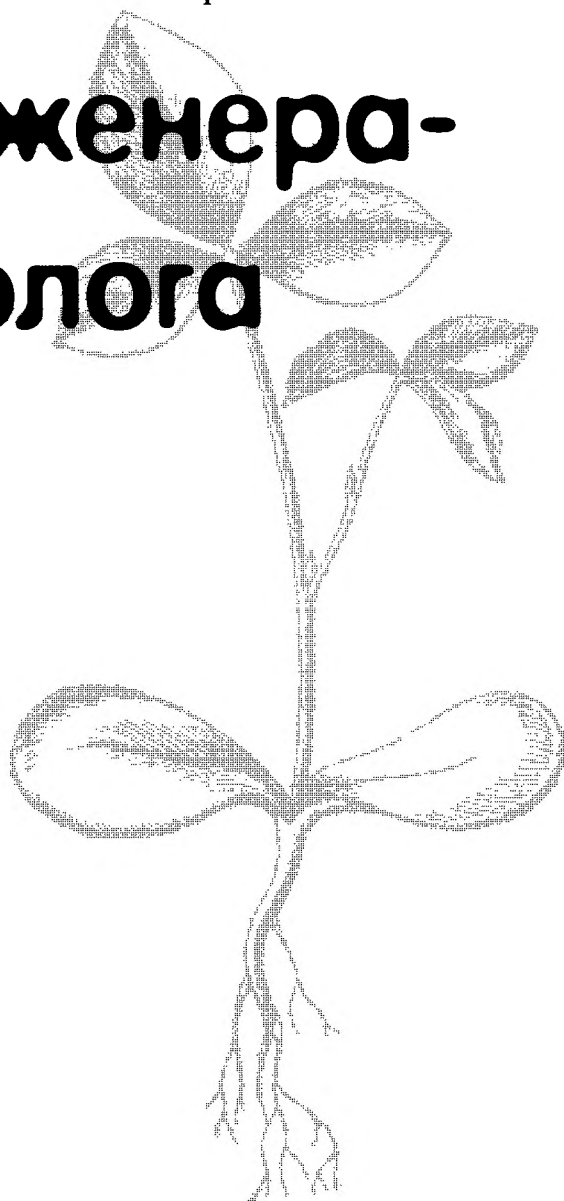
Third Edition

 **Newnes**

У. Болтон

Карманный справочник

Инженера- метролога



УДК 006.91(035)

ББК 30.10я2

Б79

Болтон У.

Б79 Карманный справочник инженера-метролога.
— М.: Издательский дом «Додэка-XXI», 2002. —
384 с.

ISBN 5-94120-040-4

Книга знакомит со средствами и методами измерений, с основными компонентами измерительных систем, учит правильному выбору и применению систем измерения в конкретных условиях. В справочнике объяснены физические принципы методов и даны математические основы их количественной оценки. Специальный раздел посвящен применению микропроцессоров в измерительных системах. Описаны 184 метода измерения химического состава, плотности, перемещений, электрических характеристик, гидродинамических потоков, силы, уровня, давления, радиации, деформации, температуры. Рассмотрено 30 типов датчиков, 28 преобразователей сигналов, 18 видов устройств отображения получаемой информации. Более 300 иллюстраций поясняют принципы функционирования методов и приборов.

Книга предназначена для инженеров, научных работников и студентов технических специальностей, но может быть полезна всем читателям, интересующимся метрологией.

УДК 006.91(035)

ББК 30.10я2

Newnes Instrumentation a measurement Pocket Book 3ed by Bolton

ISBN 0 7506 2885 5 (англ.) © Reed Educational & Professional
Publishing Ltd (2001)

ISBN 5-94120-040-4 (рус.) © Издательский дом «Додэка-XXI», 2002
® Серия «Карманный справочник»

Все права защищены. Никакая часть этого издания не может быть воспроизведена в любой форме или любыми средствами, электронными или механическими, включая фотографирование, ксерокопирование или иные средства копирования или сохранения информации, без письменного разрешения издательства.

www.chipindustry.ru



**ОПТОВАЯ
БАЗА
КОМПЛЕКТАЦИИ
ЭЛЕКТРОННЫХ
КОМПОНЕНТОВ
и ПРИБОРОВ
для
РОЗНИЧНОЙ ТОРГОВЛИ
и ПРОИЗВОДСТВА**

(095) 973-7073
(многоканальный)

Все товары в розницу в магазинах Чип и Дип
Единная справочная магазинов : Тел.: (095) 945-52-51, (095) 945-52-81,
(095) 945-52-85 e-mail: sales@chipdip.ru

Содержание

Предисловие	12
Часть первая. СИСТЕМЫ	13
1. Измерительные системы	14
Основные части измерительной системы	14
Передающая функция системы	15
Программируемые приборы	16
Калибровка	16
2. Терминология	19
3. Погрешности	25
Источники погрешностей	25
Разброс результатов	26
Вероятная погрешность	27
Допустимая погрешность	28
Суммирование погрешностей	28
Точность системы	29
4. Динамические характеристики	31
Статические и динамические характеристики	31
Приборы нулевого порядка	31
Приборы первого порядка	31
Теплопередача	32
Приборы второго порядка	33

Пружинные системы с демпфированием	34
Оператор дифференцирования (D-оператор)	35
D-оператор и система первого порядка	37
D-оператор и система второго порядка	37
Преобразование Лапласа	38
Преобразование Лапласа для системы первого порядка	41
Преобразование Лапласа для системы второго порядка	42
Передаточная функция системы	43
5. Погрешность, вносимая измерительной системой . . .	44
Происхождение вносимой погрешности	44
Электрические измерения	44
Погрешность, вносимая вольтметром	45
Погрешность, вносимая потенциометром	45
Погрешность, вносимая мостом Уитстона	47
Погрешность, вносимая элементами измерительной системы	48
6. Помехи	50
Виды помех	50
Виды интерференции	50
Уменьшение интерференции	51
Взаимные помехи	52
Случайные шумовые помехи	52
Подавление случайных шумовых помех	53
Отношение сигнал/шум	53
Коэффициент усиления шума	54
Осреднение	54
7. Надежность	55
Надежность и ненадежность	55
Отказ	55
Работоспособность	57
Интенсивность отказов и долговечность	57
Экспоненциальный закон надежности	58
Надежность системы	59
Резервирование	60
Часть вторая. КОМПОНЕНТЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ	61
8. Датчики	62
Датчики сопротивления	63
Емкостные датчики	69

Индуктивные датчики	71
Термоэлектрические датчики	79
Пьезоэлектрические датчики	83
Фотоэлектрические датчики	85
Электрохимические датчики	87
Датчики упругости	88
Пневматические датчики	91
Дифференциальные датчики давления	92
Механические датчики	93
Вибрационные датчики	97
9. Преобразователи сигналов	98
Мосты Уитстона постоянного тока	99
Мосты переменного тока	103
Потенциометрические мосты	109
Усилители	111
Линеаризация сигналов	118
Масштабирование тока и напряжения	119
Ослабление	123
Фильтрация	125
Модуляция	128
Аналого-цифровое преобразование	129
10. Устройства отображения	136
Измерители	137
Регистраторы с прямой записью	139
Гальванометрические регистраторы	140
Регистраторы со следящей системой	147
Электронно-лучевые трубки	149
Алфавитно-цифровые дисплеи	157
Печатающие устройства	159
Записывающие устройства на магнитной ленте	160
Часть третья. ИЗМЕРЕНИЯ	165
11. Химический состав	166
Хроматография	166
Электрохимический анализ	172
Спектроскопия	176
Масс-спектрометрия	182
Методы термического анализа	183
12. Плотность	185
Весовые методы	185
Методы плавучести	186

Методы по измерению давления	187
Вибрационные методы	189
Радиационные методы	191
13. Перемещения	192
Механические измерения линейных перемещений	192
Пневматические измерители линейных перемещений	196
Электрические измерения линейных перемещений	197
Оптические измерения линейных перемещений	199
Электрические измерения угловых перемещений	202
Датчики положения оси	203
Оптические измерения угловых перемещений	204
14. Электрические величины	206
Магнитоэлектрические измерители	209
Электронные измерители	214
Ферродинамический измеритель	217
Термопарные измерители	219
Электродинамический измеритель	220
Электронный ваттметр	224
Электросчетчики ватт-часов	225
Электростатические измерители	226
Цифровые вольтметры	227
Мосты постоянного тока	230
Мосты переменного тока	232
Потенциометрические мосты	233
Трансформаторные мосты	234
Q-метр	236
Измерение частоты	240
15. Поток	242
Расходомеры по перепаду давления	245
Механические расходомеры	251
Расходомеры вытеснительного типа	253
Магнитогидродинамические расходомеры	259
Ультразвуковые расходомеры	260
Колебательные расходомеры	263
Прямые измерения массовых расходов	266

Косвенные методы определения массового расхода	268
Измерение мгновенной скорости потока по перепаду давления	268
Термические методы измерения мгновенной скорости потока	270
Тарировка расходомеров любых типов	271
16. Сила	272
Рычажные методы взвешивания	272
Компенсационные методы	274
Методы измерения сил, использующие элементы упругости	274
Методы измерения сил по давлению	277
17. Уровень	278
Визуальные методы	279
Поплавковые методы	280
Датчики по перемещению	283
Методы по давлению	284
Весовые методы	286
Электрические методы	287
Ультразвуковые методы	289
Радиационные методы	290
Термические методы	291
18. Давление	292
Измерители давления по высоте столба жидкости	293
Диафрагмы	299
Капсулы и сильфоны	302
Трубки Бурдона	303
Струнно-вибрационные датчики давления	305
Пьезоэлектрические датчики давления	306
Тарировка датчиков давления	306
19. Излучение	307
Газовые детекторы	307
Сцинтилляционные счетчики	310
Фоторегистрация излучения	311
Термолюминесцентные датчики	312
20. Напряжение и деформация	313
Экстензометры (измерители расширения)	313
Тензометры	315
Измерение деформаций на полной поверхности	318

Измерение напряженных состояний методом фотоупругости	318
21. Температура	320
Термометры, использующие эффект расширения метериалов	321
Резистивные термометры	325
Термометры, использующие термоэлектрический эффект	326
Пирометры	327
22. Вакуум	332
Измерители, основанные на законе Бойля—Мариотта	332
Измерители давления по теплопроводности	334
Ионизационные измерители	335
Часть четвертая. МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ СИСТЕМЫ	339
23. Микропроцессоры в приборах	340
Программируемые приборы	340
Основные элементы микропроцессорных систем	342
Микропроцессор	344
Микроконтроллеры	346
Основные элементы приборов на основе микропроцессоров	346
Системы сбора данных	348
Плата УСД	349
Программирование микропроцессора	350
Устройство регистрации данных	351
24. Интерфейсы	352
Стандартный интерфейс	352
Интерфейсы для приборов общего назначения	352
Параллельный интерфейс Centronics	357
Последовательная передача данных	359
Интерфейс I ² C	361
Интерфейсы периферийных устройств	363
Электрическая развязка	363
Согласование по питанию	365
Буферные устройства для согласования сигналов	366

Подключение дисплеев	
на светоизлучающих диодах	367
Программируемые интерфейсы	369
Универсальные асинхронные приемники/передатчики	
(приемопередатчики)	370
Входные и выходные интерфейсы	
микроконтроллеров	370
Предметный указатель	371

Предисловие

Задачи

- Научить читателя понимать «жаргон производителя», используемый в каталогах и технической документации, на приборы и системы измерений.
- Научить читателя разбираться в различных типах приборов и измерительных систем, используемых для измерения физических величин, наиболее часто встречающихся в исследованиях и на производстве.
- Создать удобное справочное пособие по широкому спектру приборов и измерительных систем.
- Дать читателю возможность грамотно подойти к выбору приборов и измерительных систем.

Круг читателей

Книга рассчитана на студентов и аспирантов соответствующих специальностей (электрические и электронные приборы, производственные процессы и т.д.), инженеров и специалистов, использующих в своей работе измерительные приборы.

Структура книги

Часть первая — Системы. В этой части описаны основные виды измерительных систем и их характеристики, включая терминологию, погрешности, динамические характеристики, влияние нагрузок, помехи и надежность.

Часть вторая — Компоненты систем. Эта часть посвящена описанию компонентов измерительных систем, а именно: датчиков, преобразователей сигналов и систем индикации.

Часть третья — Измерения. В этой части приведены детали приборов и измерительных систем для конкретных видов измерений, таких как определение химического состава, измерение плотности, перемещения, электрических величин, потока, силы, уровня, давления, радиации, напряжения и деформации, температуры и вакуума.

Часть четвертая — Микропроцессорные системы. Это взгляд на микропроцессорные приборы, касающийся основных элементов таких систем и интерфейсов с периферийными устройствами.

Основное внимание уделяется характеристикам приборов и измерительных систем. Ссылки позволяют найти дополнительную информацию.

В. Болтон

Часть первая

Системы

1. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Основные части измерительной системы

В целом можно считать, что измерительные системы могут состоять из трех основных элементов:

1. **Чувствительного элемента**, часто называемого датчиком, — элемента, который выдает сигнал, количественно связанный с измеряемой величиной. Такие элементы получают информацию об измеряемом объекте и преобразуют ее в вид, доступный остальным частям измерительной системы с целью получения количественного значения измеряемой величины.
2. **Преобразователя сигнала**, который получает сигнал от чувствительного элемента и преобразует его в соответствии с требованиями блока отображения информации измерительной системы или системы управления. Преобразователь сигналов может состоять, в свою очередь, из трех элементов: **формирователя сигналов**, который преобразует сигнал от чувствительного элемента в физический вид, удобный для отображения; **сигнального процессора**, который улучшает качество сигнала, например, усиливает его, и **передатчика** сигнала для передачи этого сигнала на некоторое расстояние до устройства отображения.
3. **Устройства отображения** — элемента, на котором отображается выходная информация измерительной системы. Этот элемент получает информацию от преобразователя сигналов и представляет ее в виде, который человек может идентифицировать, например, в виде стрелочного указателя, перемещающегося по шкале.

Таким образом, в общем виде измерительная система состоит из датчика, подсоединенного к преобразователю сигнала, который, в свою очередь, соединен с устройством отображения. Это может быть представлено на блок-схеме в виде, показанном на Рис. 1.1.

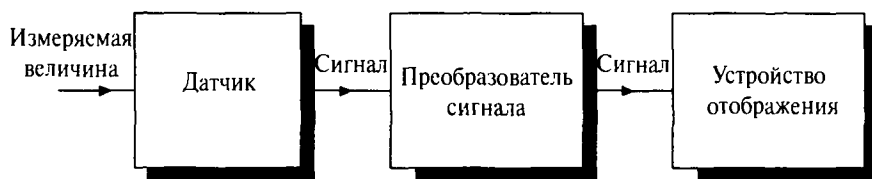


Рис. 1.1. Общий вид измерительной системы

Передаточная функция системы

При стационарных условиях передаточная функция системы — это отношение выходного сигнала θ_0 к входному сигналу θ_i :

$$\text{Передаточная функция } G = \frac{\theta_0}{\theta_i}.$$

Измерительная система может состоять из датчика, преобразователя сигнала и устройства отображения (**Рис. 1.2**). Каждый из этих элементов имеет свою собственную передаточную функцию.

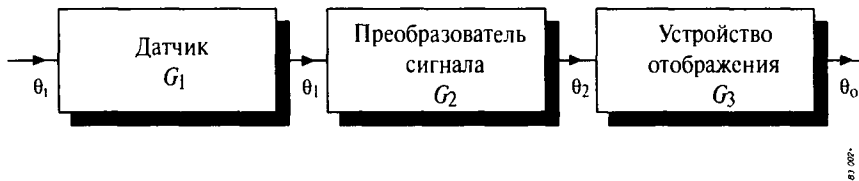


Рис. 1.2. Передаточная функция измерительной системы

Так, для датчика — это передаточная функция G_1 с входным сигналом θ_i и выходным сигналом θ_1 , являющимся входным для преобразователя сигнала:

$$G_1 = \frac{\theta_1}{\theta_i},$$

для формирователя сигнала — передаточная функция G_2 с входным сигналом θ_1 и выходным θ_2 :

$$G_2 = \frac{\theta_2}{\theta_1},$$

а для устройства отображения — передаточная функция G_3 с входным сигналом θ_2 и выходным θ_0 :

$$G_3 = \frac{\theta_0}{\theta_2}.$$

Тогда передаточная функция для всей измерительной системы может быть записана в виде:

$$G = \frac{\theta_0}{\theta_i} = \frac{\theta_1}{\theta_i} \times \frac{\theta_2}{\theta_1} \times \frac{\theta_0}{\theta_2}$$

$$G = G_1 \times G_2 \times G_3.$$

Таким образом, передаточная функция системы равна произведению передаточной функции датчика на передаточную функцию формирователя сигнала и на передаточную функцию устройства отображения. Если система содержит большее количество элементов, где выходной сигнал от одного элемента является входом только одного последующего элемента, то передаточная функция такой системы образуется как произведение передаточных функций каждого элемента.

Программируемые приборы

Термин «программируемый» применительно к измерительным системам означает, что в систему включен микропроцессор или компьютер. Термин «простой» (непрограммируемый) используется, когда в системе нет никаких микропроцессоров. В простых приборах система проводит только измерение величины, а человек должен потом обрабатывать и интерпретировать отображенные данные. На программируемых приборах проводятся не только измерения, но и обработка и интерпретация полученных данных, в результате чего могут приниматься решения по дальнейшему управлению различными процессами.

Дополнительная литература: Barney G.C. (1988), *Intelli-gent Instrumentation*, Prentice Hall.

Калибровка

Калибровка — это процесс нанесения меток на шкалу устройства отображения или проверка измерительной системы на соответствие с ранее откалиброванной (стандартной) системой, когда датчик находится при определенных условиях.

Основными стандартами, от которых происходят все остальные стандарты, являются *первичные эталоны*. Первичные эталоны определены международным соглашением и хранятся в национальных государственных учреждениях, таких как Национальная Физическая лаборатория в Великобритании и Национальное Бюро Стандартов в Соединенных Штатах Америки. Существуют семь первичных эталонов и два дополнительных.

Семь первичных эталонов:

1. **Масса.** Килограмм определяется как масса цилиндра, имеющего одинаковую высоту и диаметр, сделанного из сплава платины (90%) и иридия (10%) и хранящегося в Международном Бюро Мер и Весов в Севре (Франция).
2. **Длина.** Метр определяется как длина пути, пройденного светом в вакууме, за время, равное $1/299792458$ доли секунды.
3. **Время.** Секунда определяется как длительность 9192631 периода излучения, испускаемого атомом Цезия 133 при точно определенных условиях резонанса.
4. **Ток.** Ампер определяется как сила установившегося электрического тока, который проходя по двум параллельным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения, расположенным на расстоянии 1 метра один от другого в вакууме, вызвал бы между этими проводниками силу, равную $2 \cdot 10^{-7}$ Н на каждый метр длины.
5. **Температура.** Кельвин (К) определяется температурой тройной точки воды (когда все три фазы воды — жидкая, па-

рообразная и твердая — находятся в равновесии), которая равна 273.16 К.

6. **Сила света.** Кандела (свеча) определяется как сила света, излучаемого в данном направлении от определенного источника, испускающего монохроматическое излучение частотой 540·10¹² Гц и мощностью излучения 1/683 Вт на одинстерадиан (единица измерения телесного угла).

7. **Количество вещества.** Мера количества вещества – моль. В моле содержится такое количество элементарных частиц, какое находится в 0.012 кг изотопа углерода-12.

Термин «элементарные компоненты» может относиться к атомам, молекулам, ионам, электронам или к другим частицам.

Два дополнительных эталона:

1. **Плоский угол.** Радиан — это плоский угол между двумя радиусами окружности, дуга между которыми равна по длине радиусу
2. **Телесный угол.** Стерadian — это телесный угол конуса с вершиной в центре сферы, вырезающий на поверхности сферы площадь, равную площади квадрата со стороной, равной по длине радиусу сферы.

Эти первичные эталоны используются для определения национальных эталонов не только в эталонных единицах измерения, но и в единицах, производных от них. Например, эталон сопротивления витка проволоки из манганина основывается на эталонных единицах измерения длины, массы, времени и тока. Обычно эти национальные эталоны, в свою очередь, используются для определения образцовых мер, которые хранятся в метрологических центрах и используются для выполнения калибровочных работ на производстве. Такие калибровочные эталоны также могут находиться непосредственно на производстве для периодической калибровки приборов.

В **Табл. 1.1** представлен список некоторых наиболее часто используемых единиц измерения и их соотношения с основными единицами измерения.

Табл. 1.1. Производные единицы

Параметр	Название единицы	Размерность в первичных единицах
Ускорение	Метр на секунду в квадрате	м·с ⁻²
Угловое ускорение	Радиан на секунду в квадрате	Рад·с ⁻²
Угловая скорость	Радиан на секунду	Рад·с ⁻¹
Площадь	Квадратный метр	м ²
Емкость	Фарада	с ⁴ ·А ² ·кг ⁻¹ ·м ⁻²
Плотность	Килограмм на кубический метр	кг·м ⁻³

Табл. 1.1 (окончание)

Параметр	Название единицы	Размерность в первичных единицах
Электрический заряд	Кулон	$A \cdot c$
Напряженность электрического поля	Вольт на метр	$m \cdot kg \cdot A^{-1} \cdot c^{-3}$
Электрический потенциал	Вольт	$m^2 \cdot kg \cdot c^{-3} \cdot A^{-1}$
Энергия	Джоуль	$m^2 \cdot kg \cdot c^{-2}$
Сила	Ньютон	$kg \cdot m \cdot c^{-2}$
Частота	Герц	c^{-1}
Индуктивность	Генри	$m^2 \cdot kg \cdot c^{-2} \cdot A^{-2}$
Сила магнитного поля	Ампер на метр	$A \cdot m^{-1}$
Магнитный поток	Вебер	$m^2 \cdot kg \cdot A^{-1} \cdot c^{-2}$
Магнитная индукция	Тесла	$kg \cdot A^{-1} \cdot c^{-2}$
Мощность	Ватт	$m^2 \cdot kg \cdot c^{-3}$
Давление	Паскаль	$kg \cdot m^{-1} \cdot c^{-2}$
Сопротивление	Ом	$m^2 \cdot kg \cdot A^{-2} \cdot c^{-3}$
Удельная теплоемкость	Джоуль на килограмм и Кельвин	$m^2 \cdot K^{-1} \cdot c^{-2}$
Скорость	Метр на секунду	$m \cdot c^{-1}$
Теплопроводность	Ватт на метр Кельвин	$m \cdot kg \cdot K^{-1} \cdot c^{-3}$
Объем	Кубический метр	m^3

2. ТЕРМИНОЛОГИЯ

Далее приводятся термины, используемые в основном при описании характеристик измерительных систем или элементов таких систем.

Бел. См. *Децибелы*.

Бит (разряд). Это аббревиатура для двоичной цифры, 0 или 1.

Взаимные помехи. Это интерференция, которая появляется между соседними каналами, подключенными или к коммутатору, или к какому-либо устройству с параллельными входами.

Воспроизводимость. Воспроизводимость показаний прибора — это способность прибора отображать одни и те же показания при повторных измерениях одного и того же значения измеряемой величины.

Время реакции (время отклика). При изменении измеряемой величины измерительной системе требуется определенное время, называемое временем реакции, чтобы полностью отреагировать на это изменение.

Гистерезис. Приборы могут выдавать разные показания, а, следовательно, и погрешности, для одной и той же измеряемой величины в зависимости от того, росла эта величина или непрерывно уменьшалась в течение предыдущего промежутка времени (Рис. 2.1). Этот эффект, называемый гистерезисом, происходит в результате таких явлений, как трение скольжения или люфт в механических частях приборов. Погрешность гистерезиса — это разность между значениями одной и той же измеряемой величины, полученными в процессе ее возрастания и убывания до этого значения. Гистерезис часто выражается как процентное отношение максимального гистерезиса к отклонению на всю шкалу прибора

$$\text{Гистерезис} = \frac{\text{максимальная погрешность гистерезиса}}{M_{\max} - M_0} \times 100\%.$$

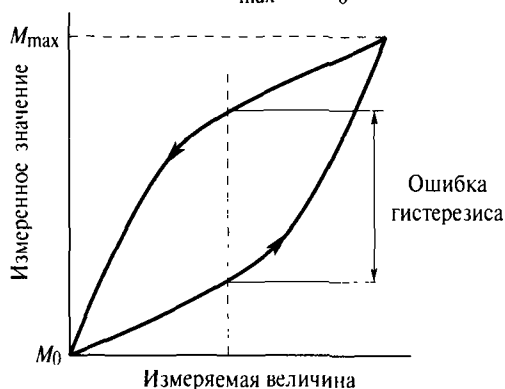


Рис. 2.1. Гистерезис

Двоичное слово (Слово). Слово — это набор битов (разрядов). В стандартных или обычных двоичных числах имеет значение положение битов в слове: младший значащий разряд (МЗР) располагается на правом конце слова, а старший значащий разряд (СЗР) — на левом конце слова. Десятичное значение битов в слове определяется следующим образом:

$$\begin{array}{ccccccc} 2^{n-1} & \dots\dots\dots & 2^3 & 2^2 & 2^1 & 2^0 & \\ \text{СЗР} & & & & & & \text{МЗР} \end{array}$$

Децибелы. Это отношение двух значений либо электрической, либо акустической мощности, обычно выражаемое в логарифмических единицах. Десятичный логарифм этого отношения имеет размерность бел. Децибел — это одна десятая часть бела

$$\begin{aligned} N_{\text{бел}} &= \lg (P_1 / P_2) \\ N_{\text{дБ}} &= 10 \lg (P_1 / P_2). \end{aligned}$$

Если два напряжения V_1 и V_2 приложены к двум электрическим цепям с одинаковым импедансом, т.е. $P_1 = V_1^2 / Z$; $P_2 = V_2^2 / Z$, то $P_1 / P_2 = V_1^2 / V_2^2$ и, следовательно,

$$N_{\text{дБ}} = 20 \lg (V_1 / V_2).$$

Аналогично для токов:

$$N_{\text{дБ}} = 20 \lg (I_1 / I_2).$$

Диапазон измерений. Диапазон измерений прибора — это интервал, внутри которого могут быть произведены измерения.

Дрейф. Говорят, что у прибора есть дрейф, если его выходной сигнал со временем постепенно изменяется, и это не зависит от изменения входного сигнала. Смотрите также определение дрейфа нуля.

Дрейф нуля. Эта величина показывает, насколько изменяются показания прибора при отсутствии сигнала на входе с течением времени.

Дрейф чувствительности. Дрейф чувствительности — это величина, показывающая насколько изменяется чувствительность прибора в результате изменения окружающих условий.

Задержка. Говорят, что измерительная система имеет задержку, если изменение ее показаний происходит не одновременно с изменением измеряемой величины, а только через некоторое время.

Истинное значение. Это значение величины с погрешностью, равной нулю.

Коэффициент усиления. Коэффициент усиления системы или элемента — это отношение выходного сигнала ко входному.

$$\text{Коэффициент усиления} = \text{выход} / \text{вход}.$$

Мертвая зона. Мертвая зона прибора — это диапазон значений измеряемой величины, в котором выходной сигнал прибора никак не изменяется.

Надежность. Надежность прибора — это вероятность нормального функционирования прибора в условиях, определенных для его применения.

Отношение сигнал/шум. Отношение сигнал/шум — это отношение значения сигнала V_s к уровню внутреннего шума системы V_n . Это отношение обычно выражается в децибелах, т.е.

$$\text{Отношение сигнал/шум в дБ} = 20 \lg (V_s/V_n).$$

Передаточная функция. Передаточная функция — это отношение выходного сигнала системы или элемента этой системы к ее (его) входному сигналу:

$$\text{Передаточная функция} = \frac{\text{выходной сигнал}}{\text{входной сигнал}}.$$

Погрешность. Погрешность измерения — это разность между результатом измерений и истинным значением измеряемой величины.

$$\text{Погрешность} = \text{измеренное значение} - \text{истинное значение}.$$

Погрешность линейности (нелинейность). Элемент или система обладают линейной функцией преобразования, если их выходной сигнал прямо пропорционален входному. Однако в реальных случаях эта функция, хотя и принимается линейной, идеально линейной не является, поэтому и появляется погрешность. Нелинейность — это разность между истинным и принятыми значениями измеряемой величины в предположении, что система измерения линейна. Таким образом, на **Рис. 2.2** показана величина нелинейности N для случая, когда измеренное значение равно M .

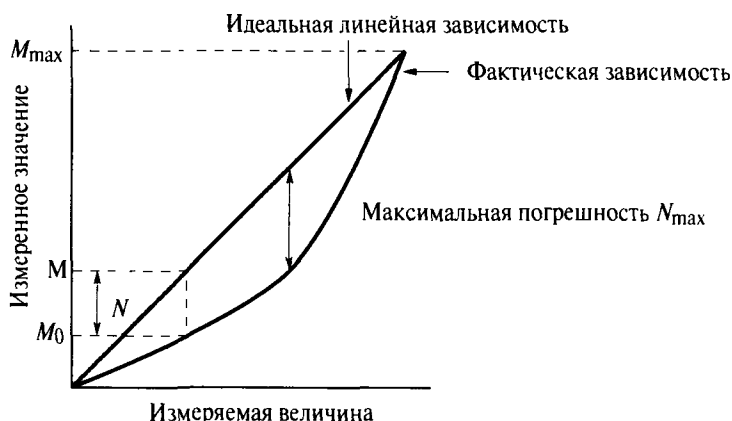


Рис. 2.2. Нелинейность

Нелинейность часто выражается как процентное отношение максимальной ошибки линейности к отклонению на всю шкалу прибора. Таким образом, нелинейность можно определить выражением (Рис. 2.2):

$$\text{Нелинейность} = \frac{N_{\max}}{M_{\max} - M_0} \times 100\% .$$

Погрешность квантования. Эта погрешность возникает в цифро-аналоговых и аналого-цифровых преобразователях из-за шага квантования, который определяет величину вклада наименьшего значащего разряда.

Полоса пропускания. Полоса пропускания может быть определена как диапазон частот, для которого передаточная функция составляет не меньше 70.7% от максимальной величины G (Рис. 2.3). 70.7% от G — это $G/\sqrt{2}$. Альтернативное определение: полоса пропускания — это диапазон частот, для которого передаточная функция находится внутри зоны 3 дБ (децибел) от максимального значения. Изменение на три децибела означает то, что передаточная функция изменяется в $1/\sqrt{2}$ раз.

$$\begin{aligned} \text{Изменение в дБ} &= 20 \lg (\text{величина} / \text{максимальную величину}) = \\ &= 20 \lg (1/\sqrt{2}) = 3 \end{aligned}$$



Рис. 2.3. Полоса пропускания

Порог чувствительности. Порог чувствительности — это минимальный уровень входного сигнала, который должен быть достигнут для появления различимых изменений в показаниях прибора (Рис. 2.4). Это верхняя граница мертвой зоны при изменении входного сигнала от нулевого значения.

Постоянная времени. При резком изменении сигнала на входе, т.е. при ступенчатом изменении входного сигнала, системе требуется определенное время, чтобы достичь конечного



Рис. 2.4. Порог чувствительности

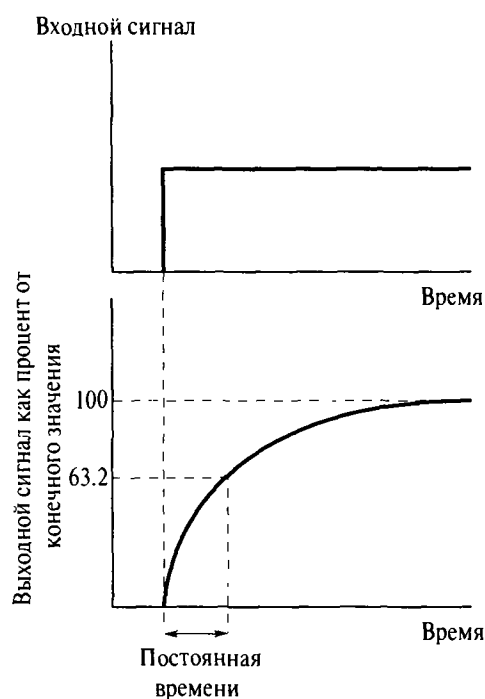


Рис. 2.5. Постоянная времени

значения сигнала на выходе (Рис. 2.5). Постоянная времени — это время, которое требуется для того, чтобы выходной сигнал достиг уровня, равного 63.2% от конечного значения выходного сигнала. (См. главу 4.)

Разрешающая способность (дискриминация). Разрешающая способность прибора — это минимальное изменение измеряемой величины, которое приведет к различимому изменению в показаниях на выходе прибора.

Скорость нарастания выходного сигнала. Скорость нарастания выходного сигнала — это максимально возможная скорость изменения выходного сигнала.

Смещение. Смещение прибора — это постоянная ошибка, которая существует во всем диапазоне его измерений.

Стабильность (повторяемость измерений). Стабильность прибора — это способность прибора отображать одни и те же показания при измерении одной и той же величины в течение определенного промежутка времени или при измерении этой величины определенное количество раз.

Сходимость. Сходимость — это степень разброса результатов измерений из-за случайных ошибок. Она показывает, насколько близко друг к другу находятся результаты измерений одной и той же величины, проведенные несколько раз при одних и тех же условиях.

Точность. Точность прибора — это интервал, показывающий, насколько могут быть неверными его показания. Термин «статическая точность» употребляется, когда измеряемая величина либо не меняется, либо меняется очень медленно, а динамическая — при быстром ее изменении. Точность может быть оценена как плюс или минус некоторой величины переменной. Например, амперметр может быть оценен по точности величиной ± 0.1 А при некоторой конкретной величине тока или для всех его показаний. Альтернативно можно оценить точность как процент от отклонения на всю шкалу прибора, т.е. амперметр может иметь оценку точности как $\pm 2\%$ от полной шкалы. Это означает, что точность показаний амперметра при использовании шкалы 0...10 А равна $\pm 2\%$ от 10 А, т.е. ± 0.2 А.

Частота опроса. На некоторых приборах, например цифровых вольтметрах, показания снимаются через определенные промежутки времени. Чем больше частота опроса, т.е. чем больше количество измерений в секунду, тем лучше показания прибора отражают быстроизменяющийся входной сигнал.

Чувствительность. Чувствительность прибора — это:

$$\text{Чувствительность} = \frac{\text{изменение показаний по шкале прибора}}{\text{изменение измеряемой величины}}.$$

Шум квантования. Это шум, который как бы добавляется к аналоговому сигналу из-за погрешности квантования.

3. ПОГРЕШНОСТИ

Источники погрешностей

Погрешности могут классифицироваться как случайные и систематические. *Случайные погрешности* — это погрешности, которые могут меняться произвольным образом при последовательном измерении одной и той же величины. *Систематические погрешности* — это погрешности, которые не изменяются от измерения к измерению. Далее приводятся основные источники таких ошибок в измерительных системах.

1. Случайные погрешности

- а) *Инструментальные погрешности*. Этот вид погрешностей проявляется во многих случаях, например, такие погрешности могут появиться при считывании показания по шкале, если шкала и стрелка не находятся в одной плоскости; в свою очередь, полученные данные зависят от угла, под которым человек смотрит на шкалу (так называемые погрешности параллакса). Также такие погрешности появляются из-за неопределенности, которая существует при оценке показаний прибора, когда стрелка находится между маркерами шкалы.
- б) *Погрешности из-за влияния окружающей среды*. Эти погрешности могут возрастать в результате изменения окружающих условий, таких как изменение температуры или появление электромагнитного воздействия.
- в) *Стохастические погрешности*. Они появляются в результате стохастических процессов, таких как шум (см. главу 6). Стохастические процессы являются одной из причин случайных возмущений.

2. Систематические погрешности

- а) *Конструкционные погрешности*. Этот вид погрешностей обусловлен технологией производства на заводе-изготовителе и связан с допустимыми разбросами в размерах деталей и значениях электрических компонентов, используемых в данном приборе.
- б) *Погрешности аппроксимации*. Этот вид погрешностей возникает из-за сделанных предположений относительно зависимостей между величинами. Например, линейная зависимость между двумя величинами часто только предполагается, а на практике это предположение может оказаться только аппроксимацией к истинной зависимости.
- в) *Погрешности старения*. Эти погрешности вызываются процессами старения приборов, так как детали изнашиваются и их характеристики изменяются, например из-за слоев грязи, окислов и т.д., скопившихся на поверхности деталей, изменяются сопротивление контактов и их изоляционные свойства.

- г) *Погрешности подключения.* Эти погрешности возникают, если включение приборов в измерительную цепь приводит к изменению значения самой измеряемой величины. Например, включение амперметра в электрическую цепь для измерения тока в ней приводит к изменению тока в этой цепи из-за сопротивления самого амперметра.

Разброс результатов

Результаты последовательности измерений одной и той же величины могут быть построены в виде графика их частотного распределения. Параметр «частота» показывает количество появлений некоторого значения или значений измеряемой величины внутри диапазона всех значений. Построенная зависимость частоты появления значений от самой измеряемой величины и есть частотное распределение (**Рис. 3.1**). Это распределение показывает, как меняются значения, полученные в процессе измерений. Чем шире это распределение, тем меньше точность измерений.



Рис. 3.1. Частотное распределение

При обработке серии проведенных измерений для представления полученного результата часто используются следующие понятия:

1. **Среднее арифметическое значение ($\bar{x}$).** Это сумма всех результатов измерений, деленная на количество рассматриваемых измерений n

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{n}.$$

2. **Мода.** Это наиболее часто получаемое значение измеряемой величины. Если частотное распределение симметрично, то мода и среднее значение будут равны. В случае несимметричности распределения, как на **Рис. 3.2**, эти величины будут различны.
3. **Медиана.** Это значение, которое делит частотное распределение на две равные площади. В случае симметричности распределения медиана будет равна среднему значению.

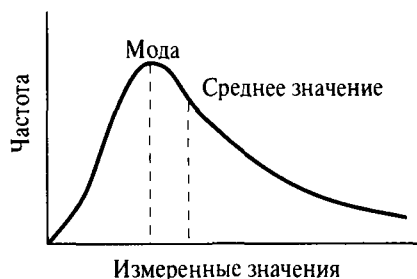


Рис. 3.2. Среднее значение и мода

Оценка точности или разброса частотного распределения проводится при помощи **среднеквадратического отклонения (стандартного отклонения)**. Для измерения отклонение d — это разность между средним и полученным значениями. Сумма квадратов полученных отклонений ($\sum d^2$), деленная на количество измерений n , дает среднее значение квадратов отклонений. Квадратный корень из этого значения и есть среднеквадратическое отклонение, или стандартное отклонение σ

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum d^2}{n}}.$$

Вероятная погрешность

Частотное распределение серии измерений показывает отклонения, т.е. погрешности, результатов измерений от среднего значения. Частотное распределение обычно отображается в виде, показанном на Рис. 3.3. Эта форма представления называется **нормальным распределением Гаусса**. Такое распределение показывает, что наиболее часто встречающееся значение измеряемой величины, у которого нет погрешности измерения, и есть среднее значение; что малая погрешность имеет большую вероятность, чем большая; и что вероятность получить результат измерения больше среднего значения на заданную величину



Рис. 3.3. Распределение Гаусса

погрешности равна вероятности получения результата меньше среднего значения на такую же величину погрешности.

По распределению Гаусса видно, что вероятность попадания результата измерения в интервал одного стандартного отклонения от среднего значения равна 68.3%, в интервал двух стандартных отклонений — 95.5%, в интервал трех стандартных отклонений — 99.7%, а четырех — 99.99%. Вероятность попадания результата измерения в интервал, составляющий $\pm 0.6745\sigma$ от среднего значения, равна 50%. Интервал 0.6745σ называется **вероятной погрешностью**.

Таким образом, фраза «вероятная погрешность для серии измерений» означает, что существует 50% вероятности того, что при произвольной выборке одного из измерений его случайное отклонение укладывается в интервал $\pm 0.6745\sigma$ от среднего значения.

Допустимая погрешность

В документации на некоторые детали и приборы гарантируется, что отклонения их основных характеристик будут находиться внутри интервала, составляющего определенный процент от заданных значений этих величин. Эти отклонения в данном случае и называются допустимыми погрешностями.

Суммирование погрешностей

Значение величины может определяться расчетным путем по результатам нескольких измерений, каждое из которых может иметь свои собственные погрешности. Если результаты получаются:

- а) суммированием измерений: для получения полной погрешности складываются абсолютные погрешности каждого измерения;
- б) вычитанием измерений: для получения полной погрешности складываются абсолютные погрешности каждого измерения;
- в) перемножением измерений: для получения полной относительной погрешности складываются относительные погрешности каждого измерения;
- г) делением измерений: для получения полной относительной погрешности складываются относительные погрешности каждого измерения;
- д) возведением в степень: для получения полной относительной погрешности показатель степени умножается на относительную погрешность измерения.

Вывод вышеописанных зависимостей может быть показан на примере сложения результатов измерений. Предположим, что величина X получается в результате сложения значений двух измерений A и B . Тогда в случае отсутствия в измерениях каких-либо погрешностей можно записать:

$$X = A + B.$$

Однако, принимая во внимание погрешности, это выражение превратится в

$$X \pm \delta X = A \pm \delta A + B \pm \delta B.$$

Таким образом,

$$\delta X = \delta A + \delta B.$$

При сложении результатов двух измерений их погрешности складываются.

При перемножении результатов двух измерений в случае отсутствия погрешностей можно записать:

$$X = A \times B.$$

Учитывая погрешности, это выражение примет вид:

$$X \pm \delta X = (A \pm \delta A)(B \pm \delta B).$$

Пренебрегая малыми величинами, можно записать:

$$X \pm \delta X = AB \pm A\delta B \pm B\delta A,$$

$$\delta X = A\delta B + B\delta A.$$

Следовательно,

$$\frac{\delta X}{X} = \frac{A\delta B + B\delta A}{AB},$$

$$\frac{\delta X}{X} = \frac{\delta B}{B} + \frac{\delta A}{A},$$

$$\frac{\delta X}{X} \times 100 = \frac{\delta B}{B} \times 100 + \frac{\delta A}{A} \times 100.$$

Относительная погрешность X равна сумме относительных погрешностей измерений.

То же самое справедливо и для процентных погрешностей.

Точность системы

Если передаточная функция датчика — G_1 , его входной сигнал — θ_i , а его выходной сигнал — θ_1 , то при отсутствии погрешностей:

$$\theta_1 = G_1 \theta_i.$$

Из-за погрешностей выходной сигнал попадет в интервал значений $(\theta_1 \pm \delta\theta_1)$, следовательно, и передаточная функция G_1 будет изменяться в некотором диапазоне значений и, таким образом, ее следует записать в виде $(G_1 \pm \delta G_1)$. Следовательно, зависимость между входным и выходным сигналом должна быть записана в виде:

$$\theta_1 \pm \delta\theta_1 = (G_1 \pm \delta G_1)\theta_i.$$

Выходной сигнал от датчика является входным сигналом для преобразователя сигнала. Из-за наличия погрешностей передаточная функция преобразователя сигнала должна быть записана в виде: $(G_2 \pm \delta G_2)$. Тогда выходной сигнал преобразователя $(\theta_2 \pm \delta\theta_2)$ можно представить как:

$$\theta_2 \pm \delta\theta_2 = (G_2 \pm \delta G_2)(\theta_1 \pm \delta\theta_1) = (G_2 \pm \delta G_2)(G_1 \pm \delta G_1)\theta_i.$$

Выходной сигнал преобразователя сигнала является входным для устройства отображения. Из-за наличия погрешностей передаточную функцию устройства отображения следует записать в виде: $(G_3 \pm \delta G_3)$. Тогда выходной сигнал на выходе всей измерительной системы можно представить как:

$$\theta_0 \pm \delta\theta_0 = (G_3 \pm \delta G_3)(\theta_2 \pm \delta\theta_2) = (G_3 \pm \delta G_3)(G_2 \pm \delta G_2)(G_1 \pm \delta G_1)\theta_i.$$

θ_0 — это выходной сигнал системы, а погрешность $\delta\theta_0$ — это полная погрешность системы с входным сигналом θ_i . Если пренебречь малыми величинами, тогда:

$$\begin{aligned} \theta_0 \pm \delta\theta_0 &= (G_3 G_2 G_1 \pm G_2 G_1 \delta G_3 \pm G_3 G_1 \delta G_2 \pm G_3 G_2 \delta G_1)\theta_i = \\ &= G_3 G_2 G_1 \left(1 \pm \frac{\delta G_3}{G_3} \pm \frac{\delta G_2}{G_2} \pm \frac{\delta G_1}{G_1} \right) \theta_i. \end{aligned}$$

При отсутствии каких-либо погрешностей это выражение можно было бы представить в виде:

$$\theta_0 = G_3 G_2 G_1 \theta_i.$$

Таким образом, $G_1 G_2 G_3$ — это полный номинальный коэффициент усиления системы.

Следовательно, разделив обе части уравнения на θ_0 , получим уравнение:

$$1 \pm \frac{\delta\theta_0}{\theta_0} = 1 \pm \frac{\delta G_3}{G_3} \pm \frac{\delta G_2}{G_2} \pm \frac{\delta G_1}{G_1},$$

$$\frac{\delta\theta_0}{\theta_0} = \frac{\delta G_3}{G_3} + \frac{\delta G_2}{G_2} + \frac{\delta G_1}{G_1},$$

где $\delta\theta_0/\theta_0$ — это относительная погрешность выходного сигнала, $\delta G/G$ — это относительная погрешность передаточной функции. Таким образом, это уравнение просто показывает, что относительная погрешность выходного сигнала — это сумма относительных погрешностей каждого элемента измерительной системы. Отсюда же следует, что процентная погрешность выходного сигнала — это сумма процентных погрешностей каждого элемента системы.

4. ДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Статические и динамические характеристики

Статические характеристики прибора относятся к измерениям в установившемся режиме, когда в нем закончились все переходные процессы.

Динамические характеристики описывают поведение прибора в интервале времени от момента изменения измеряемой величины до момента, когда с этого прибора можно будет считывать установившиеся показания.

Приборы нулевого порядка

Прибор считается прибором *нулевого порядка*, если его выходной сигнал или его показания мгновенно отслеживают изменения измеряемой величины на входе (**Рис. 4.1**). Зависимость между входным и выходным сигналом для таких приборов не включает никаких членов, зависящих от времени, и может быть записана в виде:

$$\theta_0 = k\theta_i,$$

где k — константа. Примером таких приборов является потенциометр, напряжение которого на выходе изменяется мгновенно после перемещения ползунка по его направляющей.

Приборы первого порядка

Прибор считается прибором *первого порядка*, если отношение его выходного сигнала ко входному зависит от скорости изме-

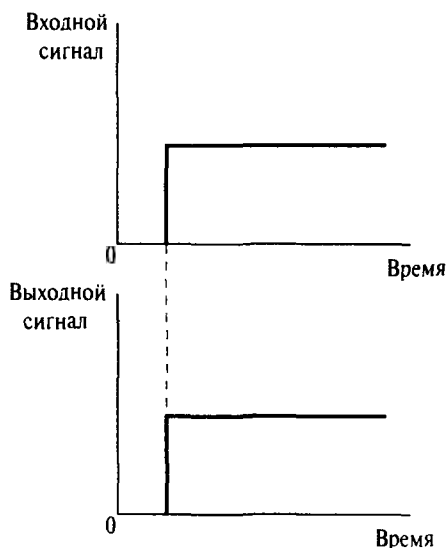


Рис. 4.1. Реакция системы нулевого порядка на скачок на входе

нения выходного сигнала. Для таких приборов зависимость между выходным θ_0 и входным θ_i сигналом можно записать в виде:

$$a_1 \frac{d\theta_0}{dt} + a_0 \theta_0 = b_0 \theta_i,$$

где $d\theta_0/dt$ — скорость изменения выходного сигнала, а a_1 , a_0 и b_0 — константы.

При резком изменении сигнала на входе, т.е. при единичном скачке, изменение выходного сигнала во времени может быть представлено в виде:

$$\frac{\theta_0}{\theta_i} = \left(\frac{b_0}{a_0} \right) (1 - e^{-t/\tau})$$

где $\tau = a_1/a_0$ называется **постоянной времени**. Через промежуток времени, равный τ , отношение θ_0/θ_i станет равным $0.63(b_0/a_0)$. Через промежуток времени, равный 2τ , это отношение будет равно $0.87(b_0/a_0)$, через 3τ — $0.95(b_0/a_0)$, через 4τ — $0.98(b_0/a_0)$, а через 5τ — $0.99(b_0/a_0)$. Таким образом, установившееся значение — это (b_0/a_0) . На **Рис. 4.2** показано изменение выходного сигнала в таких системах. Примером измерительных систем первого порядка может служить термометр (смотрите описание теплопередачи далее в этой главе).

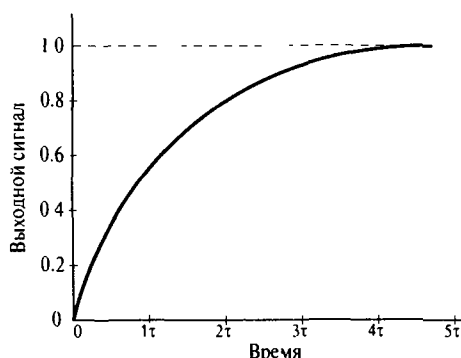


Рис. 4.2. Реакция системы первого порядка на скачок на входе

Теплопередача

Поместим термометр, показывающий температуру T , в жидкость с температурой T_1 . Скорость передачи тепла в термометр dQ/dt будет равна $k(T_1 - T)$, где k — константа. Если термометр обладает удельной теплоемкостью c и массой m , то подведенное тепло δQ за время δt приведет к изменению температуры δT в соответствии с выражением:

$$\delta Q = m \cdot c \cdot \delta T.$$

Следовательно,

$$\begin{aligned}\frac{dQ}{dt} &= mc \frac{dT}{dt}, \\ k(T_l - T) &= mc \frac{dT}{dt}, \\ mc \frac{dT}{dt} + kT &= kT_l.\end{aligned}$$

Таким образом, при скачке на входе системы, например, когда термометр с одной температурой резко помещается в жидкость с другой температурой,

$$T/T_l = (1 - e^{-t/\tau}),$$

где постоянная времени $\tau = mc/k$.

Приборы второго порядка

Прибор считается прибором *второго порядка*, если зависимость между его входным и выходным сигналом имеет вид:

$$a_2 \frac{d^2 \theta_0}{dt^2} + a_1 \frac{d\theta_0}{dt} + a_0 \theta_0 = b_0 \theta_1,$$

где a_2 , a_1 , a_0 и b_0 — константы. Когда выходной сигнал перестает меняться, это уравнение принимает вид: $a_0 \theta_0 = b_0 \theta_1$.

В такой системе при скачкообразном изменении входного сигнала на выходе могут появиться колебания. *Собственная частота* колебаний ω_n выражается в виде:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{a_0}{a_2}}.$$

Колебательные системы характеризуются также *коэффициентом затухания* ζ , определяемым как:

$$\zeta = \frac{a_1}{2\sqrt{(a_0 a_2)}}.$$

Дифференциальное уравнение, таким образом, может быть записано в виде:

$$\frac{1}{\omega_n^2} \frac{d^2 \theta_0}{dt^2} + \frac{2\zeta}{\omega_n} \frac{d\theta_0}{dt} + \theta_0 = \frac{b_0}{a_0} \theta_1.$$

Когда $\zeta = 1$, это условие называется условием *критического затухания (критического демпфирования)*, тогда решение уравнения принимает вид:

$$\theta_0/\theta_1 = (b_0/a_0)[1 - \exp(-\omega_n t)(1 + \omega_n t)].$$

Когда коэффициент затухания системы ζ меньше 1, то говорят, что система недодемпфирована, когда ζ больше 1 — система передемпфирована. **Рис. 4.3** показывает изменение выходного сигнала во времени при различных значениях коэффициента затухания ζ .

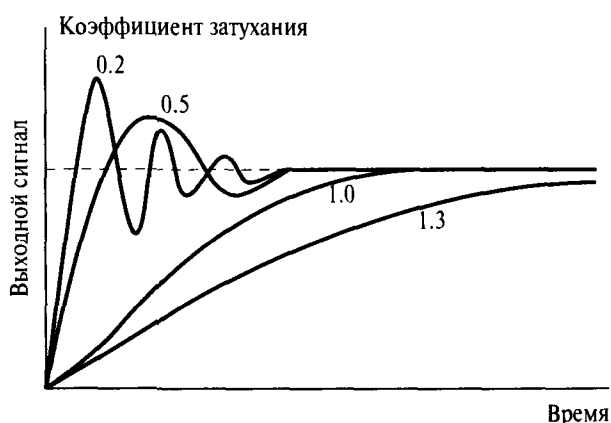


Рис. 4.3. Реакция системы второго порядка на скачок на входе

Пружинные системы с демпфированием

Многие системы второго порядка можно свести к системам, имеющим три основных элемента: массу m , пружину и демпфирующее устройство (**Рис. 4.4**).

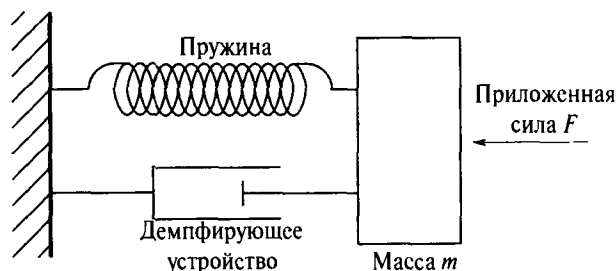


Рис. 4.4. Система с массой, пружиной и демпфирующим устройством

Результирующая сила, действующая на массу, равна разности приложенной силы F , силы упругости пружины (либо от ее растяжения, либо от сжатия) и силы демпфирующего устройства. Сила упругости от сжатия и растяжения пружины пропорциональна изменению ее длины x , т.е. ее можно представить в виде kx , где k — коэффициент жесткости пружины. В качестве демпфирующего устройства можно представить себе конструкцию, состоящую из поршня,двигающегося в цилиндре, заполненном маслом. Тогда

сила от демпфирующего устройства будет пропорциональна скорости перемещения поршня, т.е. ее можно представить в виде $c(dx/dt)$, где c — константа. Таким образом, результирующую силу R , действующую на массу m , можно представить как:

$$R = F - kx - c \frac{dx}{dt}.$$

По второму закону Ньютона эта сила заставляет массу двигаться с ускорением. Так как ускорение — это производная скорости (dv/dt), а скорость — это производная перемещения (dx/dt), то ускорение — это вторая производная перемещения (d^2x/dt^2). Следовательно,

$$F - kx - c \frac{dx}{dt} = m \frac{d^2x}{dt^2},$$

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = F.$$

В случае отсутствия демпфирующего устройства масса, прикрепленная к концу пружины, будет свободно колебаться с собственной частотой ω_n , определяемой в виде:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}.$$

Если колебания затухают с коэффициентом затухания ζ , определяемым как:

$$\zeta = \frac{c}{2\sqrt{(mk)}},$$

уравнение приобретает вид:

$$\frac{1}{\omega_n^2} \frac{d^2x}{dt^2} + \frac{2\zeta}{\omega_n} \frac{dx}{dt} + x = \frac{F}{k}.$$

Оператор дифференцирования (D-оператор)

Дифференциал $d\theta/dt$ может быть заменен на $D\theta$, где D — оператор дифференцирования. Аналогично оператор $d^2\theta/dt^2$ может быть заменен на $D^2\theta$. В общем виде можно записать:

$$D^n \theta = \frac{d^n \theta}{dt^n}.$$

К оператору D применимы обычные правила алгебры в случаях операций с константами и операций возведения его самого

в положительную степень. Таким образом, дифференциальное уравнение первого порядка

$$a_1 \frac{d\theta_0}{dt} + a_0 \theta_0 = b_0 \theta_1,$$

можно записать в виде:

$$a_1 D\theta_0 + a_0 \theta_0 = b_0 \theta_1,$$

$$\frac{\theta_0}{\theta_1} = \frac{b_0}{a_1 D + a_0} = \frac{G}{\tau D + 1},$$

где $G = b_0/a_0$, а $\tau = a_1/a_0$.

Существует много методов, которые могут быть использованы для решения дифференциальных уравнений, представленных в данном виде. Далее приведен один из них. Запишем уравнение в виде:

$$(aD^2 + bD + c)y = 0.$$

Если $y = Ae^{mx}$, то $Dy = Ame^{mx}$, а $D^2y = Am^2e^{mx}$, это означает, что:

$$aAm^2e^{mx} + bAme^{mx} + cy = 0,$$

$$Ae^{mx}(am^2 + bm + c) = 0.$$

Таким образом, $y = Ae^{mx}$ может быть единственным решением, при котором выполняется $(am^2 + bm + c) = 0$. Это уравнение называется характеристическим. Корни этого уравнения находятся по формуле:

$$m = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}.$$

Если $b^2 > 4ac$, то существуют два действительных корня этого уравнения: α и β , и можно записать решение в общем виде:

$$y = Ae^{\alpha x} + Be^{\beta x}.$$

Если $b^2 = 4ac$, то существуют два равных корня α , тогда решение уравнения принимает вид:

$$y = (Ax + B)e^{\alpha x}.$$

Если $b^2 < 4ac$, то существуют два комплексных корня этого уравнения: $\alpha \pm j\beta$, и решение записывается в виде:

$$y = (A \cos \beta x + B \sin \beta x)e^{\alpha x}.$$

Константы A и B определяются граничными условиями.

Дополнительная литература: Distefano J.D., Stubberud A.R. и Williams I.J. (1987), *Theory and Problems of Feedback and Control*, McGraw-Hill.

D-оператор и система первого порядка

Рассмотрим уравнение:

$$\frac{\theta_0}{\theta_i} = \frac{1}{\tau D + 1}$$

$$(\tau D + 1) \theta_0 = \theta_i.$$

Характеристическое уравнение получается путем замены оператора дифференцирования на алгебраическую переменную m и приравнивания θ_i нулю. Тогда

$$\tau m + 1 = 0.$$

Это значит, $m = -1/\tau$. Тогда решение уравнения имеет вид:

$$\theta_0 = A e^{mt} = A e^{-t/\tau}.$$

Это и есть решение уравнения в течение переходного процесса.

Рассмотрим теперь скачок на входе системы. Для установившихся условий величина $D\theta_0$ равна нулю. Значит, $\theta_0/\theta_i = 1/(0 + 1) = 1$. Это дает частное решение уравнения. Следовательно, общее решение может быть записано в виде суммы:

$$\theta_0 = A e^{-t/\tau} + \theta_i.$$

Для единичного скачка входного сигнала $\theta_0 = 0$ при $t = 0$. Тогда

$$0 = A e^0 + \theta_i.$$

И, таким образом, $A = -\theta_i$. Отсюда полное решение для единичного скачка на входе будет

$$\theta_0 = \theta_i(1 - e^{-t/\tau}).$$

D-оператор и система второго порядка

Рассмотрим вышеописанную процедуру применительно к системе второго порядка вида:

$$(D^2 + 2\zeta\omega_n D + \omega_n^2)\theta_0 = \omega_n^2\theta_i.$$

Запишем характеристическое уравнение:

$$m^2 + 2\zeta\omega_n m + \omega_n^2 = 0.$$

Корни его вычисляются по формуле:

$$m = \frac{-2\zeta\omega_n \pm \sqrt{(4\zeta^2\omega_n^2 - 4\omega_n^2)}}{2} =$$

$$= -\zeta\omega_n \pm \omega_n \sqrt{(\zeta^2 - 1)}.$$

Если $\zeta > 1$, то существуют два действительных разных корня этого уравнения: m_1 и m_2 , и поэтому переходный процесс можно описать в виде:

$$\theta_0 = A \exp(m_1 t) + B \exp(m_2 t),$$

$$\text{где } m_1 = -\zeta\omega_n + \omega_n \sqrt{(\zeta^2 - 1)}, \quad m_2 = -\zeta\omega_n - \omega_n \sqrt{(\zeta^2 - 1)}.$$

Если $\zeta = 1$, то существуют два равных корня, тогда:

$$\theta_0 = (At + B)\exp(-\zeta\omega_n t).$$

Если $\zeta < 1$, то существуют два комплексных корня этого уравнения, тогда:

$$\theta_0 = (A \sin \omega t + B \cos \omega t) \exp(-\zeta\omega_n t),$$

$$\text{где } \omega = \omega_n \sqrt{(\zeta^2 - 1)}.$$

При отсутствии сигнала на входе системы, когда $\theta_i = 0$ при $t = 0$, и в установившемся режиме, когда $D^2\theta_0 = 0$ и $D\theta_0 = 0$, могут быть определены константы и получены решения как для переходного, так и для установившегося режима.

Преобразование Лапласа

Преобразование Лапласа позволяет трансформировать дифференциальные уравнения в уравнения, с которыми можно далее работать как с простыми алгебраическими выражениями. Преобразование Лапласа некоторой функции от времени $f(t)$ определяется следующим образом:

$$\text{Преобразование Лапласа } F(s) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt,$$

где s — комплексная величина.

Алгоритм решения дифференциальных уравнений с использованием преобразования Лапласа:

1. Применить преобразование Лапласа к дифференциальному уравнению.
2. Выполнить в полученном уравнении все алгебраические вычисления, т.е. определить, что произойдет с системой при скачке на входе, и получить решение в Лапласовой форме.
3. Конвертировать решение в Лапласовой форме в вид функции, зависящей от времени, т.е. применить обратное преоб-

разование Лапласа. Для того чтобы использовать таблицы преобразований Лапласа, надо выполнить некоторые предварительные преобразования. Так, часто бывает необходимо сначала разделить решение в Лапласовой форме на отдельные дроби, для того чтобы привести это решение в пригодный для конвертации вид.

Далее приведены основные правила преобразования дифференциального уравнения в форму Лапласа. При этом предполагается, что функция $f(t)$ равна нулю до момента времени $t = 0$.

1. Сложение двух функций приведет к сложению их Лапласовых преобразований:

$$f_1(t) + f_2(t) \text{ превратится в } F_1(s) + F_2(s).$$

2. Вычитание одной функции из другой приведет к вычитанию их Лапласовых преобразований:

$$f_1(t) - f_2(t) \text{ превратится в } F_1(s) - F_2(s).$$

3. Умножение некоторой функции на константу приведет к умножению Лапласового преобразования на ту же самую константу:

$$af(t) \text{ превратится в } aF(s).$$

4. Функция с задержкой во времени T , т.е. $f(t - T)$ преобразуется в $F(s)e^{-Ts}$, при условии $T \geq 0$.
5. Первая производная от некоторой функции примет следующий вид: преобразование Лапласа для этой функции взятое s раз, минус значение этой функции в начальный момент времени $t = 0$:

$$\frac{d}{dt}f(t) \text{ преобразуется в } sF(s) - f(0).$$

6. Вторая производная от некоторой функции примет следующий вид: преобразование Лапласа для этой функции, взятое s^2 раз, минус значение этой функции и скорости ее изменения, увеличенное в s раз, в начальный момент времени $t = 0$:

$$\frac{d^2}{dt^2}f(t) \text{ преобразуется в } s^2 F(s) - f(0) - s \frac{d}{dt}f(0).$$

7. Определенный интеграл некоторой функции в интервале времени от 0 до t преобразуется в вид: преобразование Лапласа этой функции, умноженное на $(1/s)$:

$$\int_0^t f(t) \text{ преобразуется в } \frac{1}{s} F(s).$$

В Табл. 4.1 приведены некоторые преобразования Лапласа и соответствующие им временные функции.

Табл. 4.1. Преобразования Лапласа

Преобразование Лапласа	Временная функция	
1		Единичный импульс
$\frac{1}{s}$		Единичный скачок
$\frac{1}{s^2}$	t	Линейно возрастающая функция
$\frac{1}{s^3}$	$\frac{t^2}{2}$	
$\frac{1}{s+a}$	e^{-at}	Убывающая экспонента
$\frac{s}{s^2 + \omega^2}$	$\cos \omega t$	Косинусоидальные колебания
$\frac{\omega}{(s+a)^2 + \omega^2}$	$e^{-at} \sin \omega t$	Затухающие синусоидальные колебания
$\frac{s+a}{(s+a)^2 + \omega^2}$	$e^{-at} \cos \omega t$	Затухающие косинусоидальные колебания
$\frac{\omega^2}{s(s^2 + \omega^2)}$	$1 - \cos \omega t$	
$\frac{\omega^2}{s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2}$	$\frac{\omega}{\sqrt{1-\zeta^2}} e^{-\zeta\omega t} \sin[\omega\sqrt{1-\zeta^2}t]$	
$\frac{1}{(s+a)^2}$	te^{-at}	
$\frac{a}{s(s+a)}$	$1 - e^{-at}$	Возрастающая экспонента
$\frac{a}{s^2(s+a)}$	$t - \frac{(1 - e^{-at})}{a}$	
$\frac{s}{(s+a)^2}$	$(1 - at)e^{-at}$	
$\frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$	$\sin \omega t$	Синусоидальные колебания

Дополнительная литература: Distefano J. D., Stubberud A.R., Williams I. J. (1987), *Theory and Problems of Feedback and Control*, McGraw-Hill.

Преобразование Лапласа для системы первого порядка

Для элемента первого порядка дифференциальное уравнение имеет вид:

$$a_1 \frac{d\theta_0}{dt} + a_0 \theta_0 = b_0 \theta_1.$$

Соответствующее ему преобразование Лапласа при $\theta = 0$ и $t = 0$:

$$a_1 s \times \theta_0(s) + a_0 \times \theta_0(s) = b_0 \times \theta_1(s).$$

Передаточная функция $G(s)$ определяется как отношение преобразования Лапласа выходного сигнала $\theta_0(s)$ к преобразованию Лапласа входного сигнала $\theta_1(s)$. Таким образом,

$$G(s) = \frac{b_0}{a_1 s + a_0}.$$

Это выражение может быть преобразовано к виду:

$$G(s) = \frac{b_0 / a_0}{(a_1 / a_0) s + 1},$$

где b_0/a_0 — передаточная функция системы G в установившемся режиме, а a_1/a_0 — постоянная времени τ системы. Следовательно,

$$G(s) = \frac{G}{\tau s + 1}.$$

Рассмотрим поведение системы первого порядка при скачкообразном изменении входного сигнала. Преобразование Лапласа выходного сигнала определяется в виде:

(преобразование Лапласа выходного сигнала) = $G(s) \times$ (преобразование Лапласа входного сигнала).

Преобразование Лапласа для единичного скачка на входе равно $1/s$. Следовательно,

$$\begin{aligned} & \text{(преобразование Лапласа выходного сигнала)} = \\ & = G \times \frac{1}{\tau s + 1} \times \frac{1}{s} = G \frac{(1/\tau)}{s[s + (1/\tau)]}. \end{aligned}$$

Преобразование можно записать в виде:

$$\frac{a}{s(s + a)}, \quad \text{где } a = (1/\tau).$$

Следовательно, по обратному преобразованию Лапласа временная функция решения исходного уравнения имеет вид:

$$\theta_0 = G [1 - e^{-t/\tau}].$$

Преобразование Лапласа для системы второго порядка

Зависимость между входным и выходным сигналом для элемента второго порядка описывается дифференциальным уравнением:

$$a_2 \frac{d^2 \theta_0}{dt^2} + a_1 \frac{d\theta_0}{dt} + a_0 \theta_0 = b_0 \theta_1.$$

Если $\theta_0 = 0$; $d\theta_0/dt = 0$ при $t = 0$, то преобразование Лапласа можно записать как

$$a_2 s^2 \times \theta_0(s) + a_1 s \times \theta_0(s) + a_0 \times \theta_0(s) = b_0 \times \theta_1(s).$$

Следовательно,

$$G(s) = \frac{\theta_0}{\theta_1} = \frac{b_0}{a_2 s^2 + a_1 s + a_0}.$$

Это выражение можно представить в виде:

$$G(s) = \frac{b_0 / a_0}{(a_2 / a_0) s^2 + (a_1 / a_0) s + 1}.$$

Как было указано выше, дифференциальное уравнение второго порядка может быть записано через величины параметров собственной частоты ω и коэффициента затухания ζ . Так как (b_0/a_0) — это статическая передаточная функция G , тогда

$$G(s) = \frac{G}{(1/\omega_n^2) s^2 + (2\zeta/\omega_n) s + 1}.$$

Рассмотрим выходной сигнал при скачкообразном сигнале на входе системы.

$$\theta_0(s) = G(s)\theta_1(s).$$

Так как $\theta_1(s) = 1/s$, тогда

$$\theta_0(s) = \frac{G}{[(1/\omega_n^2) s^2 + (2\zeta/\omega_n) s + 1] s}.$$

После преобразования выражение принимает следующий вид:

$$\theta_0(s) = G \left[\frac{1}{s} - \frac{s + \zeta \omega_n}{(s + \zeta \omega_n)^2 + \omega_n^2 (1 - \zeta^2)} - \frac{\zeta \omega_n}{(s + \zeta \omega_n)^2 + \omega_n^2 (1 - \zeta^2)} \right].$$

При критическом затухании, т.е. при $\zeta = 1$,

$$\theta_0(s) = G \left[\frac{1}{s} - \frac{1}{s + \omega_n} - \frac{\omega_n}{(s + \omega_n)^2} \right],$$

$$\theta_0 = G[1 - e^{-\omega_n t} - \omega_n t e^{-\omega_n t}] = G[1 - e^{-\omega_n t} (1 + \omega_n t)].$$

Передаточная функция системы

Как указано в первом разделе, статическая передаточная функция G всей системы — это произведение передаточных функций элементов этой системы:

$$G = G_1 \cdot G_2 \cdot G_3.$$

Преобразование Лапласа для передаточной функции системы $G(s)$ — это произведение преобразований Лапласа передаточных функций каждого элемента системы, т.е.

$$G(s) = G_1(s) \cdot G_2(s) \cdot G_3(s).$$

Таким образом, например, измерительная система может состоять из элементов со следующими передаточными функциями:

$$\text{датчика: } \frac{G_1}{\tau_1 s + 1},$$

$$\text{преобразователя сигналов: } \frac{G_2}{\tau_2 s + 1},$$

$$\text{устройства отображения: } \frac{G_3}{(\tau_3 s + 1)^2}.$$

Тогда передаточная функция для всей системы будет иметь следующий вид:

$$G(s) = \frac{G_1}{\tau_1 s + 1} \times \frac{G_2}{\tau_2 s + 1} \times \frac{G_3}{(\tau_3 s + 1)^2}.$$

5. ПОГРЕШНОСТЬ, ВНОСИМАЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ

Происхождение вносимой погрешности

Если термометр при комнатной температуре поместить в горячую воду для измерения ее температуры, то сам акт помещения термометра в воду уже изменит ее температуру. Таким образом, сам процесс измерения изменяет измеряемую температуру. Подсоединение амперметра в электрическую цепь для измерения в ней силы тока изменит полное сопротивление этой цепи, что приведет к изменению в ней тока. Следовательно, и в этом случае сам процесс измерения изменяет измеряемую величину.

Электрические измерения

По теореме Тевенина, активную цепь с двумя выводами А и В для подсоединения электрической нагрузки Z_L (Рис. 5.1) можно заменить на эквивалентную цепь, содержащую единственный источник э.д.с. E_{Th} с последовательно подключенным сопротивлением Z_{Th} , где E_{Th} — это разность потенциалов, замеренная между выводами А и В при отсоединенной нагрузке Z_L , а Z_{Th} — это сопротивление цепи между А и В, если все источники э.д.с. внутри цепи были закорочены и заменены на их внутренние сопротивления.

Таким образом, подсоединение нагрузки Z_L к выходным выводам активной цепи равнозначно подсоединению нагрузки Z_L к эквивалентной цепи с э.д.с. E_{Th} и внутренним сопротивлением Z_{Th} , как показано на Рис. 5.1б. Очевидно, что ток i через нагрузку Z_L равен:

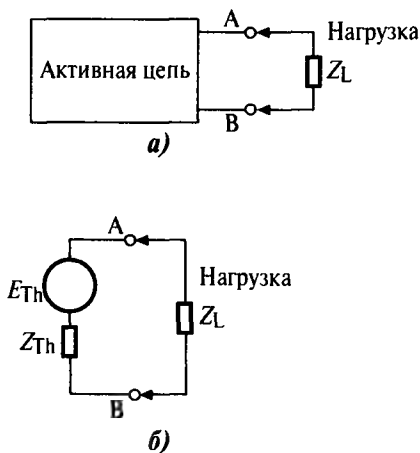


Рис. 5.1. а — электрическая цепь с подсоединенной нагрузкой;
б — эквивалентная цепь

$$i = \frac{E_{\text{Th}}}{Z_{\text{Th}} + Z_{\text{L}}}.$$

Следовательно, разность потенциалов на нагрузке V_{L} выражается в виде:

$$V_{\text{L}} = iZ_{\text{L}} = E_{\text{Th}} \frac{Z_{\text{L}}}{Z_{\text{Th}} + Z_{\text{L}}}.$$

Таким образом, нагрузка, подсоединенная к цепи, изменяет разность потенциалов от E_{Th} до V_{L} . Чем больше величина Z_{L} по отношению к Z_{Th} , тем величина V_{L} ближе по значению к E_{Th} . Отсюда следует условие максимальной передачи по напряжению: $Z_{\text{Th}} \ll Z_{\text{L}}$. Аналогично условие максимальной передачи по мощности $Z_{\text{Th}} = Z_{\text{L}}$.

Видно, что нагрузка, подключенная к цепи, приводит к появлению погрешности:

$$\text{Погрешность} = E_{\text{Th}} - V_{\text{L}} = E_{\text{Th}} \left(1 - \frac{Z_{\text{L}}}{Z_{\text{L}} + Z_{\text{Th}}} \right).$$

Погрешность, вносимая вольтметром

При подключении вольтметра с сопротивлением R_{m} к цепи с эквивалентным сопротивлением R_{Th} , показания V_{m} на его шкале будут равны:

$$V_{\text{m}} = E_{\text{Th}} \left(\frac{R_{\text{m}}}{R_{\text{m}} + R_{\text{Nh}}} \right),$$

где E_{Th} — эквивалентное напряжение в цепи, т.е. значение напряжения перед подключением вольтметра в цепь. Таким образом, внесенную погрешность можно определить так:

$$\text{Погрешность} = \frac{V_{\text{m}}}{E_{\text{Th}}} \times 100\% = \frac{R_{\text{m}}}{R_{\text{m}} + R_{\text{Th}}} \times 100\%.$$

Погрешность, вносимая потенциометром

На **Рис. 5.2а** показан потенциометр, где x — это расстояние, показывающее положение ползунка потенциометра от одного из его концов, L — полная длина трека потенциометра. Если потенциометр обладает равномерным сопротивлением на единицу длины, то напряжение между выводами А и В без подключенной нагрузки будет равно $(x/L)V_{\text{s}}$. Это и есть напряжение эквивалентной цепи:

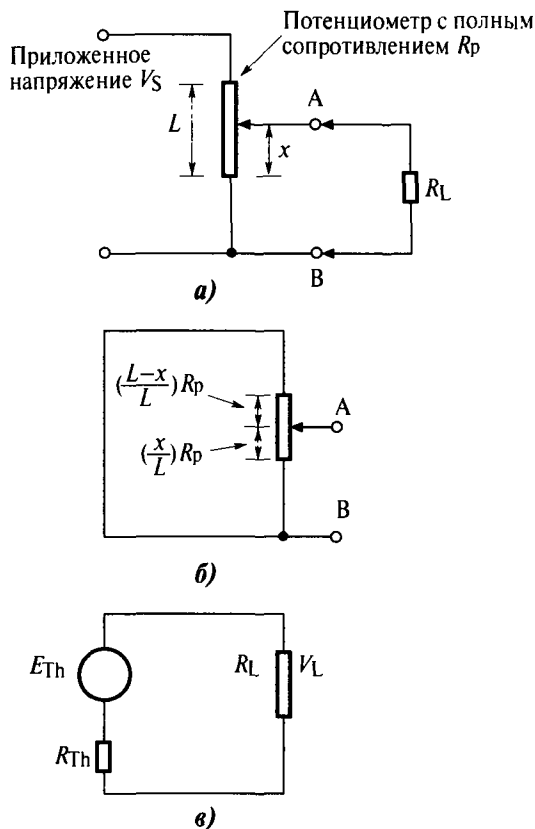


Рис. 5.2. Потенциометр: а — цепь; б — определение R_{Th} ; в — эквивалентная цепь

$$E_{Th} = (x/L)V_s.$$

Эквивалентное сопротивление находится при $V_s = 0$. Сопротивление вычисляется между выводами А и В (Рис. 5.2б). Оно состоит из двух параллельно соединенных резисторов, поэтому:

$$\frac{1}{R_{Th}} = \frac{1}{(x/L)R_p} + \frac{1}{([L-x]/L)R_p},$$

где R_p — полное сопротивление потенциометра. Следовательно,

$$R_{Th} = R_p (x/L)(1 - \{x/L\}).$$

На Рис. 5.2в показана эквивалентная цепь. Сила тока в ней определяется из соотношения:

$$(x/L)V_s = I [R_p (x/L)(1 - \{x/L\}) + R_L].$$

Следовательно, разность потенциалов на нагрузке будет равна:

$$V_L = IR_L = \frac{R_L (x/L) V_s}{R_p (x/L)(1 - \{x/L\}) + R_L} = \frac{(x/L) V_s}{(R_p / R_L)(x/L)(1 - \{x/L\}) + 1}.$$

Зависимость между V_L и x нелинейная. Поэтому подключение нагрузки приводит к появлению погрешности нелинейности.

$$\begin{aligned} \text{Погрешность нелинейности} &= E_{\text{Th}} - V_L = \\ &= (x/L) V_s \left[1 - \frac{1}{(R_p / R_L)(x/L)(1 - \{x/L\}) + 1} \right]. \end{aligned}$$

Если $R_L \gg R_p$, уравнение упрощается до приблизительного соотношения:

$$\text{Погрешность нелинейности} = V_s (R_p / R_L) (\{x/L\}^2 - \{x/L\}^3).$$

Максимальное значение этой погрешности возникает, когда производная $d(\text{погрешность})/dx = 0$, т.е. при $(x/L) = 2/3$. Следовательно, максимальная погрешность нелинейности равна $0.148 V_s (R_p / R_L)$.

Погрешность, вносимая мостом Уитстона

Эквивалентное напряжение для моста Уитстона (Рис. 5.3а) — это напряжение в цепи без нагрузки при $I = 0$. Так как V_s — это разность потенциалов между выводами А и С, то:

$$\begin{aligned} V_s &= I_1(R_1 + R_2), \\ V_s &= I_2(R_3 + R_4). \end{aligned}$$

Разность потенциалов между А и В, т.е. на сопротивлении R_1 , равна $I_1 R_1$, а между А и D, т.е. на сопротивлении R_4 , равна $I_2 R_4$. Таким образом, разность потенциалов между В и D равна:

$$E_{\text{Th}} = I_1 R_1 - I_2 R_4 = \frac{V_s R_1}{R_1 + R_2} - \frac{V_s R_4}{R_3 + R_4}.$$

Эквивалентное сопротивление R_{Th} между В и D (Рис. 5.3б) равно последовательному соединению двух пар параллельных резисторов R_1, R_2 и R_3, R_4 . Следовательно,

$$R_{\text{Th}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4}.$$

E_{Th} — это разность потенциалов на выходе без нагрузки. С нагрузкой цепь можно представить в виде, показанном на Рис. 5.3в. Тогда

$$E_{\text{Th}} = I (R_L + R_{\text{Th}}).$$

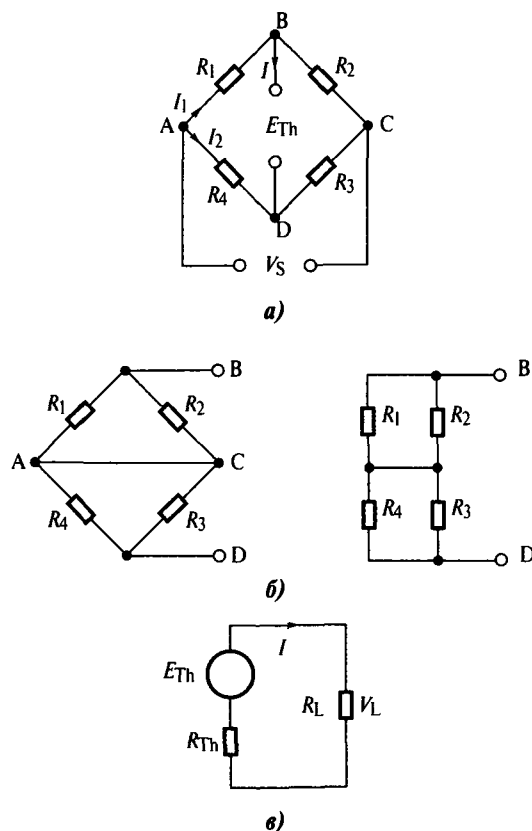


Рис. 5.3. Мост Уитстона: а — определение E_{Th} ; б — определение R_{Th} ; в — эквивалентная цепь с нагрузкой

Разность потенциалов на нагрузке V_L равна выходному напряжению:

$$V_L = IR_L = \frac{E_{Th} R_L}{R_L + R_{Th}} = \frac{V_s R_L [R_1 / (R_1 + R_2) - R_4 / (R_3 + R_4)]}{R_L + [R_1 R_2 / (R_1 + R_2) + R_3 R_4 / (R_3 + R_4)]} =$$

$$= \frac{R_L V_s (R_1 R_3 - R_2 R_4)}{R_L (R_1 + R_2)(R_3 + R_4) + R_1 R_2 + R_3 R_4}.$$

Погрешность, вносимая элементами измерительной системы

Рассмотрим измерительную систему (Рис. 5.4), состоящую из датчика, усилителя и устройства отображения. Датчик без нагрузки имеет выходное напряжение V_t и сопротивление R_t . Усилитель имеет входное сопротивление R_{in} , которое является нагрузкой для датчика. Следовательно, разность потенциалов V_{in} на этой нагрузке будет равна:

$$V_{in} = I_t R_{in} = \frac{V_t R_{in}}{R_t + R_{in}}.$$

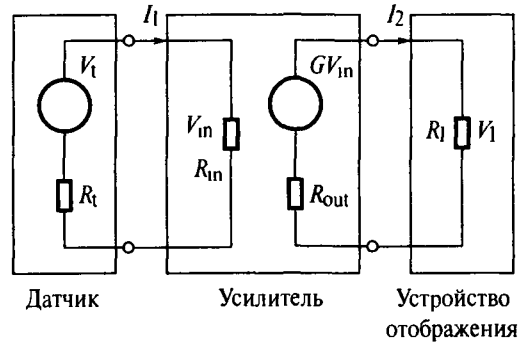


Рис. 5.4. Влияние измерительной системы

Если передаточная функция усилителя — G , то выходной сигнал усилителя без нагрузки будет GV_{in} . Если выходное сопротивление усилителя — R_{out} , а входное сопротивление устройства отображения — R_l , то выходная разность потенциалов на устройстве отображения V_l равна:

$$V_l = I_2 R_l = \frac{GV_{in} R_l}{R_{out} + R_l} = \frac{GV_t R_l R_{in}}{(R_t + R_{in})(R_{out} + R_l)}.$$

6. ПОМЕХИ

Виды помех

Термин «помехи» чаще всего используется для обозначения нежелательных сигналов, которые могут улавливаться системой измерения и интерферировать с полезным сигналом. Существуют два вида помех:

1. **Наводка (интерференция).** Она возникает из-за влияния внешних электромагнитных полей на электрическую цепь измерительной системы. Например, существует интерференция между сигналами в контуре измерительной системы и расположенными поблизости мощными электроприборами, особенно если они включены в одну электросеть.
2. **Случайный шум.** Этот вид помехи возникает из-за хаотического движения электронов и других заряженных частиц в элементах и определяется основными физическими характеристиками компонентов данной системы.

Виды интерференции

Существуют три основных вида интерференции:

1. Обусловленная **индуктивной связью**. Иногда этот вид интерференции относят к **электромагнитной или магнитной связи**. Изменение тока в близкорасположенных электрических цепях приводит к изменению магнитного поля в проводниках. Изменение магнитного поля индуцирует в проводниках системы измерения вторичную э.д.с. — наводку.
2. Обусловленная **емкостной связью**. В измерительных системах силовые кабели, провода заземления и проводники располагаются близко друг от друга и отделяются только воздухом и диэлектрическими покрытиями. Поэтому между силовыми кабелями и проводниками и между проводниками и заземлением может появиться некоторая электрическая емкость. Это и есть емкостная связь между проводниками измерительной системы и остальной частью системы, которая и приводит к возникновению интерференции сигналов.
3. Обусловленная **плохим заземлением системы**. В измерительной системе могут возникнуть проблемы с помехами, если в ней существует несколько точек заземления, так как между ними может появиться некоторая разность потенциалов. Если это произойдет, то в цепи заземление—измерительный контур системы может возникнуть интерференционный электрический ток, который и является причиной помехи.

Уменьшение интерференции

Существуют следующие способы уменьшения интерференции (наводки):

1. **Использование витых пар проводов.** Элементы измерительной системы соединяются витыми парами проводов (**Рис. 6.1**). Изменение магнитного поля будет индуцировать вторичную э.д.с. одного направления и величины в обоих проводах каждой части витой пары. Но если в одном проводе пары наведенная э.д.с. совпадает с направлением э.д.с. основного тока, то в смежном проводе пары ее направление противоположно основной э.д.с. Таким образом, результат влияния наведенных э.д.с. станет нулевым.

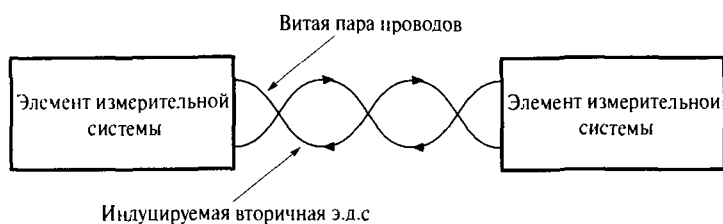


Рис. 6.1. Уменьшение интерференции при помощи витых пар проводов

2. **Электростатическое экранирование.** Идеальный способ предотвращения возникновения емкостной связи — это защита электрических контуров датчика и всей измерительной системы заземленным металлическим экраном. Но при этом могут возникнуть проблемы с контактным заземлением, например в случае, если датчик и устройство отображения имеют разные точки заземления. Коаксиальный кабель экранирует провода, соединяющие элементы измерительной системы между собой, однако при этом кабель должен иметь заземление только на одном конце для того, чтобы избежать многоконтактного заземления.
3. **Использование единственной точки заземления.** Наличие единственной точки заземления предотвратит случаи многоконтактного заземления.
4. **Использование дифференциальных усилителей.** Дифференциальный усилитель используется для усиления разности двух сигналов. Следовательно, если оба сигнала содержат один и тот же интерференционный шум, выходной сигнал усилителя уже не будет его содержать, так как он не будет усиливаться.
5. **Использование фильтров.** Селективный фильтр пропускает полезный сигнал измерительной системы, а интерференционные шумы подавляет.

Дополнительная литература: Putten A. F. P. van (1988), *Electronic Measurement System*, Prentice Hall.

Взаимные помехи

В некоторых измерительных системах выходы нескольких датчиков могут быть подсоединены при помощи многожильных кабелей или ленточных проводов. Термин «взаимные помехи» используется для описания интерференции, появляющейся между сигналами, передающимися по таким проводам. Этот вид интерференции является комбинацией емкостных и индуктивных связей. Взаимные помехи могут быть уменьшены увеличением расстояния между проводами, экранированием наиболее излучающих цепей, а в случае ленточных проводов — использованием чередования измерительных проводов и проводов заземления.

Случайные шумовые помехи

Случайные помехи могут быть следующих типов:

1. **Тепловой шум** (иногда его называют шумом Джонсона). Этот шум генерируется хаотическими движениями электронов и других заряженных частиц в резисторах и полупроводниках. Такой шум имеет непрерывный и равномерный спектр во всем частотном диапазоне, поэтому его также называют **белым шумом**. Эквивалентная (среднеквадратическая) э.д.с. для этого вида шума в полосе частот от f_1 до f_2 равна:

$$\sqrt{[4kRT(f_2 - f_1)]},$$

где k — постоянная Больцмана, R — сопротивление, T — абсолютная температура. Таким образом, широкополосные усилители производят больше белого шума, чем узкополосные. Большое сопротивление и высокая температура также будут причиной увеличения шума.

2. **Дробовой шум**. Этот шум возникает из-за случайных флуктуаций скорости диффузии заряженных частиц через потенциальные барьеры, такие как p - n -переходы. Эквивалентная э.д.с. для этого вида шума в полосе частот от f_1 до f_2 при абсолютной температуре T равна:

$$\sqrt{[2kTr_d(f_2 - f_1)]},$$

где k — постоянная Больцмана, r_d — дифференциальное сопротивление диода, равное kT/qI , здесь q — заряд электрона, а I — постоянный ток в переходе.

3. **Фликкер-шум (шум мерцаний)**. Этот вид шума возникает из-за движения потока заряженных частиц в неоднородной среде. Пример такого шума — шум, возникающий в композитных углеродистых резисторах. Эквивалентная э.д.с. для этого вида шума приблизительно обратно пропорциональна частоте.

4. **Шум из-за дребезга контактов.** Шум может появиться из-за плохого соединения. Причиной этого может быть либо грязь на контактах, либо плохая пайка.

Дополнительная литература: Putten A. F. P. van (1988), *Electronic Measurement System*, Prentice Hall.

Подавление случайных шумовых помех

Термин «нормальный шум» используется для описания всех шумов, возникающих внутри источника сигналов. Для измерительной системы этот шум неотличим от фактического измеряемого сигнала. Способность системы подавлять такой шум характеризуется **коэффициентом подавления нормального шума (КПНШ)**. Он может определяться в децибелах в виде:

$$КПНШ = 20 \lg \left(\frac{V_n}{V_e} \right),$$

где V_n — пиковое значение нормального шума, V_e — пиковое значение погрешности от этого шума при измерениях на определенной частоте.

Термин «синфазный шум» используется для описания шума, возникающего между выводом заземления и низкопотенциальным выводом измерительной системы. Способность измерительной системы подавлять такие шумы и не допускать возникновения погрешностей в показаниях прибора называется **коэффициентом подавления синфазного шума (КПСШ)**. Он определяется в децибелах в виде:

$$КПСШ = 20 \lg \left(\frac{V_{cm}}{V_e} \right),$$

где V_{cm} — максимальное значение синфазного шума, V_e — пиковое значение погрешности от этого шума при измерениях на определенной частоте.

Отношение сигнал/шум

Отношение сигнал/шум (S/N) — это отношение мощности сигнала к мощности шума.

$$\text{Отношение сигнал / шум} = \frac{\text{мощность сигнала}}{\text{мощность шума}}.$$

Оно обычно выражается в децибелах, следовательно:

$$\text{Отношение сигнал / шум} = 10 \lg \left(\frac{\text{мощность сигнала}}{\text{мощность шума}} \right).$$

Если V_s — напряжение сигнала, V_n — напряжение шума, то мощность определяется как V^2/R . Следовательно,

$$\text{Отношение сигнал/шум} = 10 \lg \left(\frac{V_s}{V_n} \right)^2,$$

$$\text{Отношение сигнал/шум} = 20 \lg \left(\frac{V_s}{V_n} \right).$$

Коэффициент усиления шума

Коэффициент усиления шума измеряется в децибелах и выражается:

$$F = 10 \lg \left(\frac{\text{полная мощность шума на выходе}}{\text{входной шум}} \right).$$

Отсюда видно, что коэффициент усиления шума оценивает величину шума, вносимого элементом системы. Если мощность входного шума P_{ni} , и передаточная функция элемента G , то мощность выходного шума можно определить как GP_{ni} . Но так как передаточная функция G — это отношение мощности выходного сигнала P_{so} к мощности входного сигнала P_{si} , то отсюда следует, что:

$$\begin{aligned} F &= 10 \lg \left[\frac{P_{n0}}{(P_{s0}/P_{si})P_{ni}} \right] = 10 \lg \left[\frac{P_{si}/P_{ni}}{P_{s0}/P_{n0}} \right] = \\ &= \frac{\text{отношение сигнал/шум на входе}}{\text{отношение сигнал/шум на выходе}}. \end{aligned}$$

Отношение сигнал/шум должно выражаться в децибелах.

Дополнительная литература: Putten A. F. P. van (1988), *Electronic Measurement System*, Prentice Hall.

Осреднение

Метод осреднения может быть использован для улучшения отношения сигнал/шум для периодических сигналов. Для одной и той же фазы волны сигнала берется выборка нескольких периодов, и получается их осредненное значение. Так как шум — случайная величина, то в ряде периодов сигнал шума будет складываться с измерительным сигналом, а в остальных периодах вычитаться из него. Поэтому в результате осреднения среднее значение шума уменьшится. Такая процедура осреднения проводится для нескольких фаз волны сигнала, и после этого восстанавливается измерительный сигнал. Улучшение отношения сигнал/шум по такому алгоритму пропорционально квадратному корню из числа выборок фаз волны измерительного сигнала.

7. НАДЕЖНОСТЬ

Надежность и ненадежность

Надежность измерительной системы или элемента измерительной системы может быть определена как вероятность того, что система или элемент будут работать с заданными значениями рабочих характеристик указанный промежуток времени при определенных условиях окружающей среды. Значения рабочих характеристик не должны отличаться от заданных более чем на $\pm 1\%$. Выход рабочих характеристик за этот диапазон считается неисправностью или отказом. Условия окружающей среды обычно задаются при температуре 20°C .

Ненадежность измерительной системы или элемента измерительной системы — это вероятность того, что система или элемент выйдут за границы заданных значений рабочих характеристик за указанный промежуток времени при определенных условиях окружающей среды.

Вероятность — это частота, с которой происходит событие за достаточно длительный интервал времени. Таким образом, в случае надежности — это вероятность безотказной работы, а в случае ненадежности — вероятность отказа. Следовательно, если в начале работы мы имеем N_0 исправных элементов, а через промежуток времени t исправных элементов осталось только N , то надежность можно определить как:

$$\text{Надежность} = \frac{N}{N_0}.$$

Число отказов за это время равно $(N_0 - N)$. Тогда ненадежность как вероятность отказов — это:

$$\text{Ненадежность} = \frac{N_0 - N}{N_0} = 1 - \frac{N}{N_0} = 1 - \text{надежность}.$$

Дополнительная литература: Putten A. F. P. van (1988), *Electronic Measurement System*, Prentice Hall; Smith D.J., (1985), *Reliability and Maintainability*, Macmillan.

Отказ

Отказ — это ситуация, при которой рабочие характеристики измерительной системы или ее элемента выходят за определенные пределы. Допустим, что тестируется N элементов в течение времени t . Отказавшие элементы ремонтируются и вновь пускаются в работу. Если в течение этого времени отказало N_f элементов, то среднее время между отказами, или среднее время безотказной работы (СВБР), можно определить как:

$$СВБР = \frac{N \times t}{N_f}.$$

Интенсивность отказов λ — это среднее число отказов на один элемент в единицу времени. Таким образом, если тестируется N элементов в течение времени t , при этом отказавшие элементы ремонтируются и вновь пускаются в работу, и если в течение этого времени отказало N_f элементов, то интенсивность отказов определяется как:

$$\lambda = \frac{N_f}{N \times t}.$$

Следовательно,

$$\lambda = \frac{1}{СВБР}.$$

В Табл. 7.1 приведены типичные значения интенсивности отказов некоторых компонентов.

Табл. 7.1. Интенсивность отказов

Компонент	Интенсивность отказов $\times 10^{-5}$ в час
Углеродистый резистор	0.05
Проволочный резистор	0.01
Бумажный конденсатор	0.1
Пленочный конденсатор	0.01
Кремниевый транзистор (>1 ватт)	0.08
Кремниевый транзистор (<1 ватт)	0.008
Лампа накаливания	0.5
Соединение пайкой	0.001
Соединение скруткой	0.0001

Когда говорится, что интенсивность отказов равна $1/100000$ в час, то это не означает, что если наблюдать за 100000 элементов в течение часа, один из них обязательно откажет. Интенсивность отказов — это среднее значение, полученное при тестировании огромного количества элементов и наблюдении большого количества отказов. Таким образом, из-за ограниченности выборки полученная при тестировании серии элементов интенсивность отказов — это только оценка вероятного значения интенсивности отказов. Для получения прогнозируемой интенсивности отказов оценочное значение интенсивности отказов обычно умножают на некоторый коэффициент. Величина этого коэффициента зависит от требуемого **доверительного уровня**. Например, если говорят, что доверительный уровень равен 60%, это означает, что, по крайней мере, в

60% рассматриваемых случаев фактическая интенсивность отказов не будет превышать прогнозируемую интенсивность отказов.

Работоспособность

Работоспособность системы — это вероятность того, что система будет находиться в рабочем состоянии определенный период времени. Она показывает долю времени, в течение которого система находится в рабочем состоянии. Таким образом,

$$\text{Работоспособность} = \frac{t_p}{t_p + t_{np}} = \frac{СВБР}{СВБР + СВР},$$

где $СВБР$ — среднее время безотказной работы, $СВР$ — среднее время ремонта, t_p — время нахождения системы в рабочем состоянии, t_{np} — время нахождения системы в нерабочем состоянии.

Интенсивность отказов и долговечность

На **Рис. 7.1** схематично показано, как изменяется интенсивность отказов для измерительной системы или ее элемента с течением времени. Здесь можно выделить три характерные зоны:

1. Период ранних отказов из-за дефекта материала и заводского брака.
2. Период нормальной работоспособности, когда интенсивность отказов практически постоянна, и отказы являются чисто случайным событием.
3. Период отказов из-за процесса старения, когда интенсивность отказов растет из-за изнашивания компонентов.

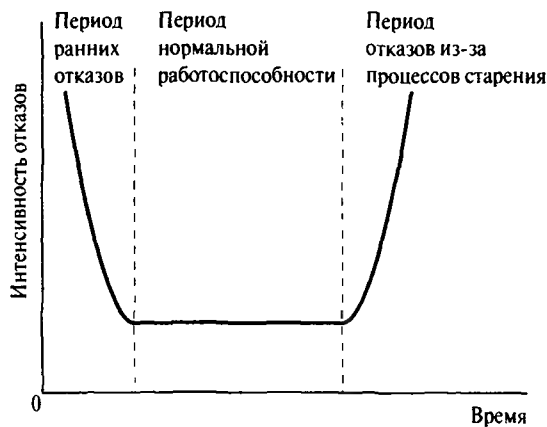


Рис. 7.1. Изменение интенсивности отказов во времени

¹**Долговечность** — способность сохранять работоспособность до наступления предельного состояния (третья зона интенсивности отказов на Рис. 7.1). Она определяется по наработке — **техническим ресурсам** или по календарному времени — **сроком службы** (прим. ред.).

Экспоненциальный закон надежности

Рассмотрим ситуацию, когда интенсивность отказов λ постоянна. Если в момент времени $t=0$ в системе было N_0 элементов в рабочем состоянии, то при отсутствии ремонта отказавших элементов через промежуток времени t в системе осталось уже только N работоспособных элементов. Через следующий интервал времени δt число элементов в рабочем состоянии уменьшится до $(N - \delta N)$. Число отказов, таким образом, равно $-\delta N$. Тогда интенсивность отказов можно выразить следующим образом:

$$\lambda = \frac{-\delta N}{N \delta t}.$$

Для предельного случая, когда $\delta t \rightarrow 0$, это выражение принимает вид:

$$\lambda = -\frac{1}{N} \frac{dN}{dt},$$

$$-\lambda dt = \frac{dN}{N}.$$

Интегрирование этого выражения дает следующее:

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\int_0^t \lambda dt,$$

$$\ln N - \ln N_0 = -\lambda t,$$

$$N = N_0 e^{-\lambda t}.$$

Так как надежность системы — это N/N_0 , получается, что:

$$\text{Надежность} = e^{-\lambda t}.$$

Общее число отказов за время t равно $(N_0 - N)$, следовательно:

$$\text{Число отказов} = N_0 - N_0 e^{-\lambda t}.$$

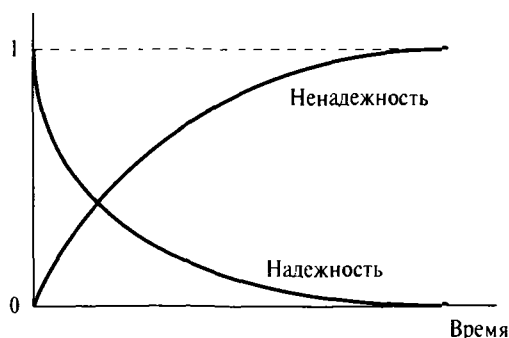


Рис. 7.2. Изменение надежности и ненадежности во времени

Так как ненадежность определяется выражением: (число отказов / N_0), то справедливо, что

$$\text{Ненадежность} = 1 - e^{-\lambda t}.$$

На **Рис. 7.2** показано изменение надежности и ненадежности с течением времени.

Надежность системы

Рассмотрим систему, состоящую из нескольких последовательно соединенных элементов, как показано на **Рис. 7.3**. Каждый элемент имеет свою собственную надежность, не зависящую от надежности других элементов. Однако отказ одного из элементов приведет к отказу всей системы. Следовательно, надежность всей системы R , состоящей из трех элементов, определяется как:

$$R = R_1 \times R_2 \times R_3,$$

где R_1, R_2, R_3 — надежность соответствующих элементов.

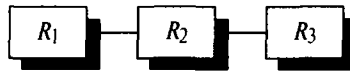


Рис. 7.3. Система, состоящая из трех последовательных элементов

Надежности перемножаются, так как вероятность того, что все три события произойдут одновременно, равна произведению вероятностей отдельных событий. Например, вероятность того, что подброшенная вверх монетка приземлится «орлом» вверх, равна $1/2$. Вероятность того, что три монетки приземлятся «орлом» вверх равна $(1/2) \times (1/2) \times (1/2) = 1/8$. Это можно понять, рассмотрев все возможные сочетания падений монет. Пусть О — это падение монетки «орлом», а Р — падение монетки «решкой», тогда различные варианты падения трех монеток можно представить в следующем виде:

ОРР ООР ООО ОРО РРР РОР РОО РРО

Очевидно, что только один вариант из восьми — падение всех трех монеток «орлом» вверх. Надежность всей системы R_s может быть описана через интенсивность отказов λ_s следующим образом:

$$R_s = \exp(-\lambda_s t).$$

Таким образом, если

$$R_1 = \exp(-\lambda_1 t), R_2 = \exp(-\lambda_2 t), R_3 = \exp(-\lambda_3 t), \text{ то} \\ \exp(-\lambda_s t) = \exp(-\lambda_1 t) \cdot \exp(-\lambda_2 t) \cdot \exp(-\lambda_3 t) = \exp(-(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3)t).$$

Следовательно, $\lambda_s = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3$.

Отсюда видно, что интенсивность отказов системы равна сумме интенсивностей отказов составляющих ее элементов.

Резервирование

Надежность системы может быть улучшена при использовании более надежных элементов. Другой способ повышения надежности — метод резервирования в системе. Это означает, что для отдельных элементов системы ставятся параллельно такие же элементы (**Рис. 7.4**). В этом случае отказ системы происходит при отказе обоих элементов.

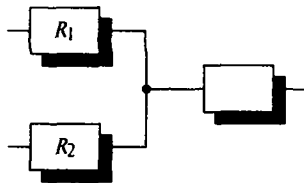


Рис. 7.4. Резервирование

Ненадежность одного из параллельных элементов определяется как $(1 - R_1)$, а другого — $(1 - R_2)$. Ненадежность — это вероятность отказа. Вероятность отказа обоих элементов — это произведение индивидуальных вероятностей отказа, потому что вероятность совпадения двух независимых событий всегда определяется произведением их вероятностей. Следовательно, ненадежность системы из двух элементов или вероятность отказа двух элементов одновременно — это:

$$\text{Ненадежность системы} = (1 - R_1) (1 - R_2).$$

Тогда надежность системы можно определить как:

$$\text{Надежность системы} = 1 - (1 - R_1) (1 - R_2) = R_1 + R_2 - R_1 R_2.$$

Часть вторая

Компоненты измерительных систем

8. ДАТЧИКИ

Табл. 8.1 показывает виды входных и выходных сигналов для датчиков, представленных в этой главе.

Табл. 8.1. Датчики

Виды переменных		Датчик
Вход	Выход	
Ускорение	Заряд	15
Переменная разность потенциалов	Ультразвуковые волны	16
Угловое перемещение	Угловое перемещение	13
Угловое перемещение	Разница потенциалов	4
Угловое перемещение	Емкость	7
Угловое перемещение	Импульсы	28, 29
Угловое положение	Импульсы	29
Угловая скорость	Импульсы/э.д.с. переменного тока	10
Плотность	Частота	31
Перемещение	Емкость	6
Перемещение	Емкость	8
Перемещение	Индуктивность	9
Перемещение	Разность индуктивности	11
Перемещение	Разность потенциалов	12
Перемещение	Давление	25
Расход жидкости	Импульсы/э.д.с. переменного тока	27
Расход жидкости	Давление	26
Скорость потока жидкости	Сопротивление	2
Сила	Заряд	15
Сила	Перемещение	20, 21
Сила	Частота	30
Сила	Сопротивление	20, 21
Интенсивность света	Ток	18
Интенсивность света	Разность потенциалов	17
Интенсивность света	Сопротивление	5
Уровень жидкости	Емкость	8
pH — водородный показатель	Разница потенциалов	19
Давление	Емкость	6
Давление	Заряд	15
Давление	Перемещение	22, 23, 24
Деформация	Сопротивление	3
Температура	Э.д.с.	14
Температура	Сопротивление	1
Вибрация	Заряд	15

Датчики сопротивления

1. Датчики температуры

Зависимость сопротивления металла от температуры может быть представлена выражением:

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t + \beta t^2 + \gamma t^3 + \dots),$$

где R_t — сопротивление отрезка провода при температуре $t^\circ\text{C}$, R_0 — его сопротивление при температуре 0°C , α , β и γ — коэффициенты температурной чувствительности сопротивления, причем $\alpha > \beta > \gamma$. Для большинства металлов сопротивление увеличивается в основном по линейному закону от температуры, а β и γ являются коэффициентами более высокого порядка, которые очень малы, и ими можно пренебречь. Для такого линейного соотношения можно записать:

$$R_t = R_0 (1 + \alpha t).$$

На **Рис. 8.1** показаны графики температурной зависимости сопротивлений, а в **Табл. 8.2** даны соответствующие коэффициенты температурной зависимости сопротивления для трех металлов, которые обычно используются для датчиков.

Табл. 8.2. Коэффициенты температурной зависимости сопротивлений

Металл	$\alpha [^\circ\text{C}^{-1}]$
Медь	3.8×10^{-3}
Никель	6.7×10^{-3}
Платина	3.9×10^{-3}

Сопротивление полупроводников также изменяется с температурой. Группа датчиков, основанная на этом принципе, называется **термисторами** или **терморезисторами**. Они изготавливаются из смеси металлических оксидов, таких как оксиды хрома, кобальта, железа, марганца и никеля, сформированных в виде бусинок, дисков или стержней. График температурной зависимости сопротивления термистора является существенно нелинейным и может быть описан экспоненциальным соотношением вида:

$$R_t = K e^{\frac{\beta}{t}},$$

где R_t — сопротивление при температуре t , а K и β — константы. При увеличении температуры сопротивление термисторов обычно уменьшается (**Рис. 8.2**), хотя существуют и такие, у которых сопротивление увеличивается с ростом температуры.

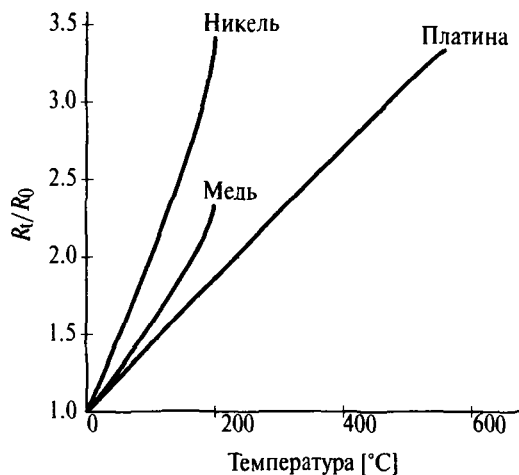


Рис. 8.1. Графики температурной зависимости сопротивления для платины, никеля и меди

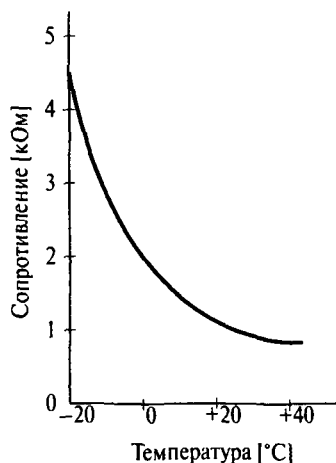


Рис. 8.2. График температурной зависимости сопротивления термистора

Но и при увеличении, и при уменьшении изменение сопротивления на градус изменения температуры у оксидов существенно больше, чем у чистых металлов. Термисторы, сопротивление которых уменьшается с ростом температуры, могут достаточно сильно нагреваться при протекании через них тока. Это означает, что если ток, протекающий через термистор, будет достаточно большим, то термистор может нагреться до температуры, большей чем температура окружающей среды. Это увеличение температуры приводит к уменьшению сопротивления и, следовательно, к дальнейшему росту тока, что повлечет еще большее увеличение температуры. Этот эффект будет продолжаться до тех пор, пока теплотери термистора не сравняются с мощностью источника его питания.

2. Проволочный нагревательный анемометр

При протекании тока i через сопротивление R вырабатывается тепло, равное $i^2 R$. Когда элемент сопротивления погружен в жидкость, его тепловые потери равняются

$$hS(\theta_t - \theta_f),$$

где h — коэффициент теплоотдачи, S — площадь эффективной поверхности сопротивления, θ_t — температура элемента сопротивления, θ_f — температура жидкости. Условие равенства этих видов тепла можно записать в виде:

$$i^2 R = hS(\theta_t - \theta_f).$$

Коэффициент теплоотдачи зависит от скорости жидкости v

$$h = a + b\sqrt{v}$$

где a и b — константы для конкретной жидкости. Таким образом, выражение принимает вид:

$$i^2 R = (a + b\sqrt{v}) S(\theta_t - \theta_f)$$

Один из способов использования элемента сопротивления в качестве датчика для определения скорости жидкости состоит в поддержании его температуры θ_t постоянной. Это достигается при использовании схемы, поддерживающей значение сопротивления R постоянным, так как величина самого сопротивления зависит от его температуры. Тогда:

$$i^2 = A + B\sqrt{v},$$

где A и B — постоянные. Такой датчик известен под названием *анемометр постоянной температуры (термоанемометр)*.

3. Тензометрические датчики деформаций

Когда деформируются или отрезок провода, или металлической фольги, или полупроводника, их сопротивление изменяется. Относительное изменение сопротивления $\Delta R/R$ прямо пропорционально величине деформации ϵ , следовательно, можно записать:

$$\Delta R/R = G\epsilon,$$

где G — постоянная величина, называемая тензометрическим коэффициентом. Для большинства материалов этот коэффициент имеет положительное значение, что соответствует росту величины сопротивления при увеличении деформации, т. е. растяжение увеличивает значение сопротивления, а сжатие, наоборот, уменьшает его.

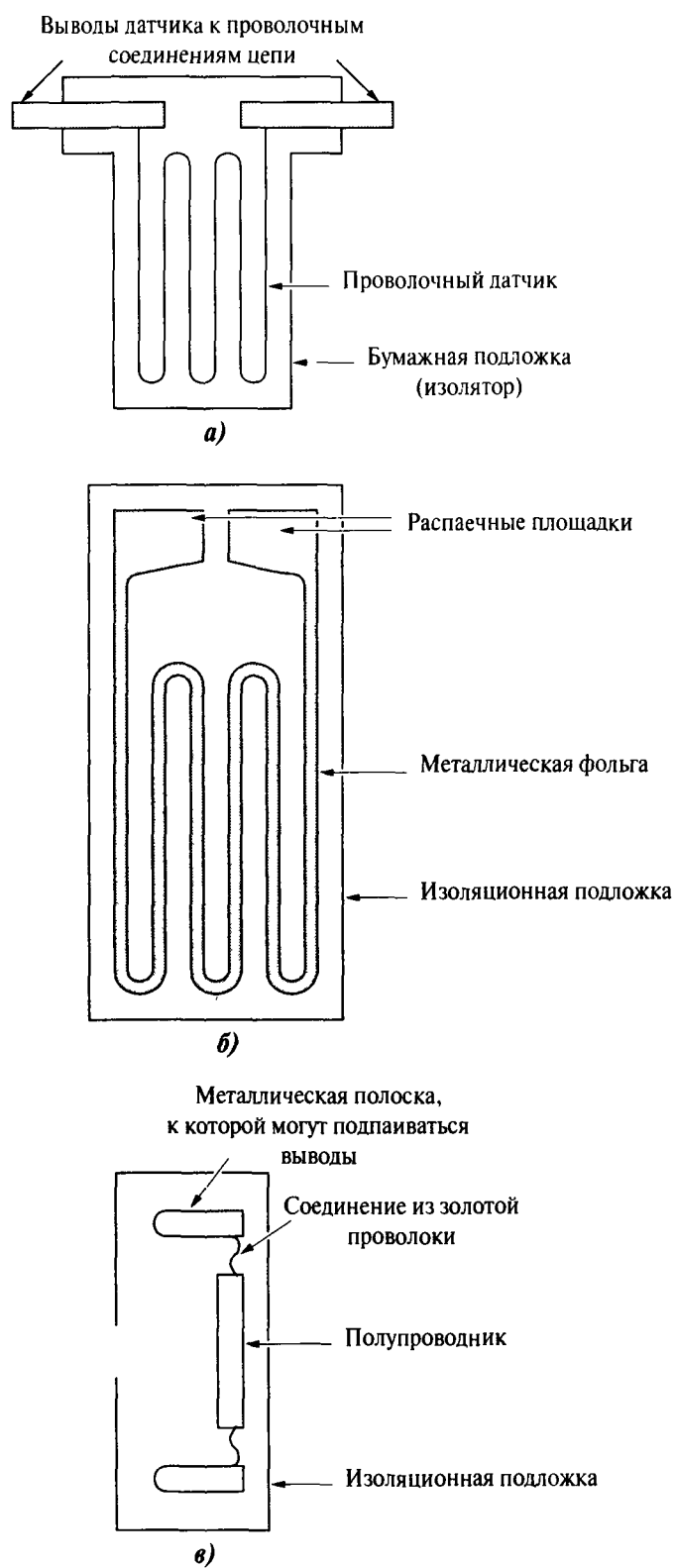


Рис. 8.3. Датчик деформаций

Термин «тензометрический датчик деформации, или тензорезистор», используется для элемента, который может быть приклеен на поверхность подобно почтовой марке, сопротивление которого изменяется при деформации объекта. Проволочный тензорезистор состоит из отрезка провода, согнутого в форме серпантина и смонтированного на подходящем материале подложки (**Рис. 8.3а**). Он имеет тензометрический коэффициент (коэффициент тензочувствительности) около 2. Тензорезистор из металлической фольги также выполняется в форме серпантина, который вытравливается из металлической фольги (**Рис. 8.3б**). Его тензометрический коэффициент также равен приблизительно 2. Полупроводниковый тензорезистор (**Рис. 8.3в**) представляет собой полосу кремния с небольшим количеством вещества *p*- или *n*-типа. Кремний *p*-типа имеет тензометрический коэффициент в диапазоне 100...175, а *n*-типа — -100...-140. Отрицательное значение тензометрического коэффициента указывает на тот факт, что величина сопротивления датчика будет уменьшаться с увеличением деформации. Полупроводники имеют преимущество перед металлическими тензорезисторами: они обладают высоким тензометрическим коэффициентом, но имеют и недостаток, который заключается во много раз большем коэффициенте температурной чувствительности сопротивления.

Сопротивление тензометрических датчиков деформации изменяется не только при изменении самой деформации, но и с изменением температуры. Способы компенсации эффектов влияния температуры описаны в главе 9.

4. Потенциометры

При протекании через резистор постоянного тока разница потенциалов на нем определяется величиной его сопротивления. Этот принцип используется в *потенциометре*. Потенциометр состоит из трека, на котором равномерно намотана высокоомная проволока, или пленочный проводящий пластик, по которым при вращении оси перемещается электрический скользящий контакт. При этом одновременно изменяется сопротивление и, следовательно, разница потенциалов между выходными клеммами 1 и 2 (**Рис. 8.4**).

Если трек имеет постоянное сопротивление на единицу длины, то выходное напряжение V_0 пропорционально длине трека между клеммами 1 и 2, а, следовательно, при круговом треке потенциометра оно пропорционально углу θ , на который повернут скользящий движок.

$$V_0 = k\theta,$$

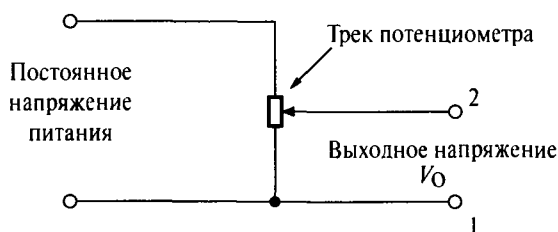


Рис. 8.4. Потенциометр

где k — константа. Следовательно, угловое перемещение также может быть преобразовано в разность потенциалов.

Далее приведены некоторые типичные характеристики потенциометров:

- разрешение для проволочных треков около 1.5 мм при грубой навивке треков и 0.5 мм для тонкой навивки;
- разрешение для проводящего пластика бесконечно мало;
- нелинейность менее 0.1...1% для проволочного трека и около 0.05% для проводящего пластика;
- сопротивление 20 Ом...200 кОм для проволочного трека и 500 Ом...80 кОм для проводящего пластика.

Проводящий пластик имеет более высокую температурную зависимость по сравнению с проволокой, и поэтому в таких потенциометрах температурные изменения оказывают большое воздействие на точность измерений. На характеристики потенциометров оказывает влияние величина сопротивления нагрузки, подключенной к выходу (См. главу 5).

5. Фоторезисторы

Фоторезистор — полупроводниковый резистор (**Рис. 8.5**). Его сопротивление уменьшается, когда интенсивность падающего на него света увеличивается. Наиболее часто используемым материалом для такого элемента является сульфид кадмия, так как его чувствительность к цветовому спектру очень

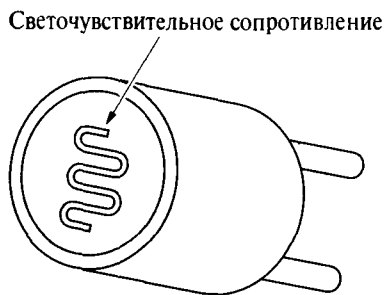


Рис. 8.5. Фоторезистор

близка к спектральной чувствительности человеческого глаза (см. Табл. 8.3). При этом максимальная чувствительность реализуется на длине волны 0.6 мкм. Фотоэлементы из сульфида свинца могут использоваться в инфракрасном диапазоне длин волн. Сопротивление таких фотоэлементов обычно меняется от мегомов в условиях темноты до нескольких сотен омов при ярком свете. Время отклика на импульс света обычно бывает близко к 50 мс.

Табл. 8.3. Фоторезисторы

Материал фоторезистора	Спектральный диапазон, [мкм]
Сульфид кадмия	0.47...0.71
Селенид кадмия	0.60...0.77
Сульфид свинца	1.0...3.0
Селенид свинца	1.5...4.0

Примечание. Диапазон спектра видимого света 0.4...0.76 мкм.

Емкостные датчики

Конденсатор, образованный двумя параллельными пластинами, разделенными диэлектриком, имеет емкость C , определяемую формулой:

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{d},$$

где ϵ_r — относительная диэлектрическая проницаемость изолирующего вещества между пластинами конденсатора, ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума ($8.85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м), A — площадь сечения в перекрывающемся пространстве между двумя пластинами, d — расстояние между пластинами. Основным принципом построения емкостных датчиков является изменение расстояния между пластинами и вариация диэлектрических свойств изолятора.

6. Датчик с изменяемым расстоянием между пластинами

Изменение расстояния между пластинами конденсатора приводит к изменению его емкости. Таким образом, если одна пластина зафиксирована, то изменение положения подвижной пластины ведет к изменению величины емкости. Датчик давления, основанный на этом принципе, состоит из круглой мембраны, играющей роль одной из пластин конденсатора, и неподвижного диска в качестве другой (Рис. 8.6). Когда давление изменяется, мембрана деформируется, изменяя расстояние между ней и неподвижной пластиной, что приводит к изменению емко-

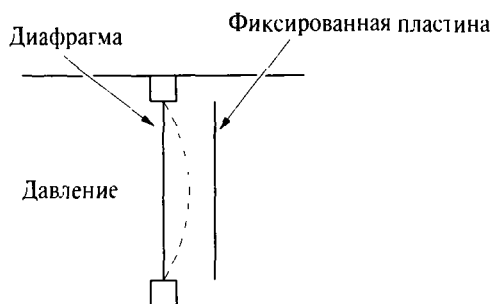


Рис. 8.6. Датчик давления с переменным расстоянием между пластинами

сти. В пункте 6 главы 9 показан другой вид емкостного датчика, также использующего принцип изменения расстояния между пластинами. Этот вид называется дифференциальным датчиком (см. **Рис. 9.10**).

7. Датчик с переменной площадью пластины

Изменение площади перекрытия пары пластин конденсатора также приведет к изменению емкости. На **Рис. 8.7** показано, как принципиально может быть использовано преобразование углового перемещения в изменение емкости конденсатора.



Рис. 8.7. Емкостный датчик с изменяющейся площадью пластины

8. Датчик с изменяющейся диэлектрической проницаемостью

Если менять относительное количество двух различных диэлектриков между пластинами конденсатора, как это показано на **Рис. 8.8**, то емкость конденсатора будет также изменяться. Такое устройство может рассматриваться как параллельное соединение двух конденсаторов. Следовательно, их общая емкость будет равна сумме емкостей двух конденсаторов, образованных двумя диэлектриками. Если w — ширина пластин конденсатора и диэлектриков, тогда

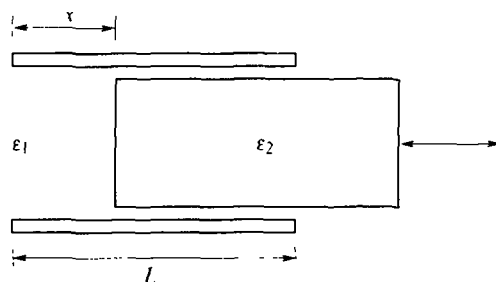


Рис. 8.8. Емкостный датчик с изменяющимся диэлектриком

$$C = \frac{\epsilon_1 \epsilon_0 w x}{d} + \frac{\epsilon_2 \epsilon_0 w (L - x)}{d} = \frac{\epsilon_0 w}{d} [\epsilon_2 L - (\epsilon_2 - \epsilon_1) x].$$

Емкость, таким образом, зависит от смещения x и может быть использована для его измерения.

На **Рис. 8.9** показана разновидность такого датчика для измерения уровня жидкости, т.е. перемещения поверхности жидкости. Пластины конденсатора здесь образованы двумя концентрическими цилиндрами с двумя диэлектриками между ними. Одним диэлектриком здесь является жидкость, а другим — воздух над поверхностью жидкости. Емкость C на единицу длины коаксиальных цилиндров с радиусами a и b равна

$$C = \frac{2\pi\epsilon_r\epsilon_0}{\ln(b/a)},$$

где ϵ_r — относительная диэлектрическая проницаемость среды между цилиндрами. Общая емкость равна сумме емкостей двух конденсаторов, один из которых имеет высоту h , а другой — $(L - h)$. Тогда:

$$C = \frac{2\epsilon_r\epsilon_0 h}{\ln(b/a)} + \frac{2\epsilon_0(L-h)}{\ln(b/a)}$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln(b/a)} [L + (\epsilon_r - 1)h].$$

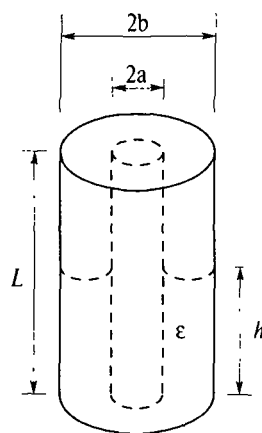


Рис. 8.9. Емкостный датчик уровня жидкости

Индуктивные датчики

9. Переменное магнитное сопротивление

Величина магнитного потока в последовательной цепи зависит от магнитного сопротивления элементов этой цепи. Для случая, показанного на **Рис. 8.10**, частью цепи является слой воз-

духа между ферромагнитной пластиной и ферромагнитным сердечником. Величина этого воздушного зазора изменяется при перемещении пластины. Следовательно, это приводит к изменению магнитного потока в цепи. Это изменение магнитного потока связано с изменением индуктивности катушки на сердечнике. Следовательно, величину перемещения пластины можно определять по изменению индуктивности катушки.

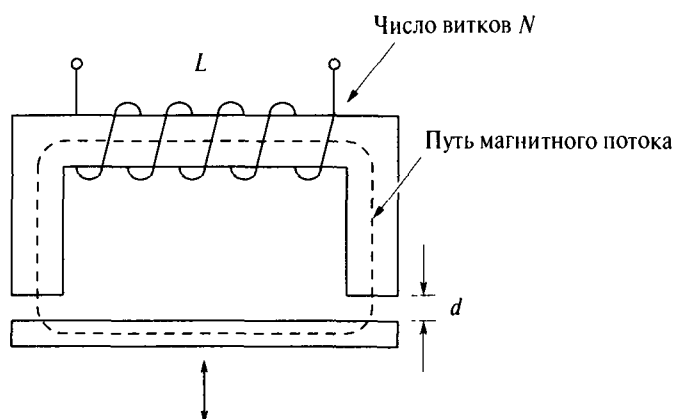


Рис. 8.10. Датчик переменного магнитного сопротивления

Общее магнитное сопротивление S последовательной цепи равно сумме магнитных сопротивлений сердечника, пластины и воздушных зазоров. Когда воздушный зазор равен нулю, т.е. $d = 0$, а магнитное сопротивление сердечника и пластины в сумме равно S_0 , индуктивность катушки можно определить как:

$$L_0 = \frac{N^2}{S_0}.$$

Когда воздушный зазор не равен нулю, его магнитное сопротивление равняется:

$$S_a = \frac{2d}{\mu_0 A},$$

где μ_0 — магнитная проницаемость вакуума, равная ($4\pi \times 10^{-7}$ Г/м), $2d$ — величина пути магнитного потока в зазорах, A — площадь поперечного сечения зазора. Тогда общее сопротивление цепи определяется выражением:

$$S = S_0 + S_a = S_0 + \frac{2d}{\mu_0 A}.$$

Следовательно, значение индуктивности обмотки равно:

$$L = \frac{N^2}{S_0 + (2d/\mu_0 A)} = \frac{L_0}{1 + (2d/\mu_0 A S_0)} = \frac{L_0}{1 + kd},$$

где k — константа. Соотношение между L и d является нелинейным. В пункте 6 главы 9 описывается другой вид датчика — дифференциальный, также использующий принцип изменения магнитного сопротивления.

10. Индукционный тахогенератор

Другой разновидностью датчика с переменным магнитным сопротивлением является индукционный тахогенератор, который используется для измерения угловой скорости вращения вала. Он состоит из зубчатого ферромагнитного колеса, которое вращается вместе с валом, и приемного устройства, состоящего из постоянного магнита, вокруг которого намотана катушка. В катушке возникает импульсное напряжение всякий раз, когда мимо нее проходит зубец колеса (Рис. 8.11). Устройство представляет собой магнитную цепь с воздушным зазором. Размер зазора зависит от того, будет вблизи магнита проходить зубец колеса или углубление между зубцами. Магнитное сопротивление цепи изменяется каждый раз, когда мимо магнита проходит зубец. Следовательно, магнитный поток, проходящий через катушку, будет колебаться вокруг некоторой средней величины. Эти колебания близки по форме к синусоидальным. Такие изменения магнитного потока наводят в цепи переменную э.д.с. И частота, и амплитуда этой э.д.с. будут пропорциональны угловой скорости вращения колеса. Если колесо содержит n зубьев и вращается с угловой скоростью ω , то выражение для магнитного потока в катушке можно записать в виде:

$$\Phi = \Phi_0 + \Phi_a \cos n\omega t,$$

где Φ_0 — средняя величина магнитного потока, Φ_a — амплитуда изменения потока. Если катушка состоит из N витков, то наведенная на ней э.д.с. E будет равна:

$$E = -\frac{Nd\Phi}{dt} = -\frac{Nd}{dt}(\Phi_0 + \Phi_a \cos n\omega t) = N\Phi_a n\omega \sin n\omega t.$$

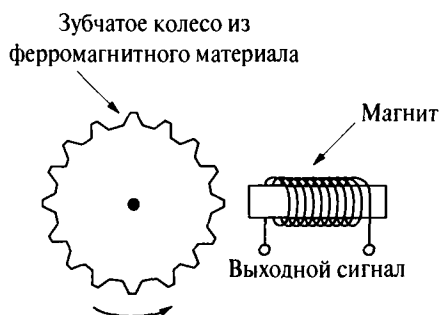


Рис. 8.11. Индукционный тахогенератор

Это уравнение можно записать в виде:

$$E = E_{\max} \sin 2\pi ft.$$

Максимальная величина этой э.д.с. равна, таким образом, $N\Phi_a\omega n$, а ее частота f равна $n\omega/2\pi$.

Другой способ обработки выходного сигнала с катушки состоит в использовании формирователя импульсов для преобразования выходного переменного напряжения в последовательность импульсов, которые могут быть пересчитаны счетчиком.

11. Дифференциальный индуктивный преобразователь

Дифференциальный индуктивный преобразователь состоит из двух одинаковых катушек, между которыми помещен движущийся якорь (сердечник) из высокопроницаемого магнитного материала (Рис. 8.12).

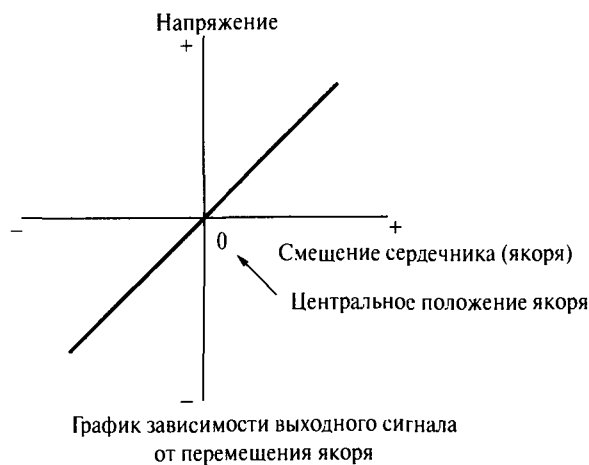
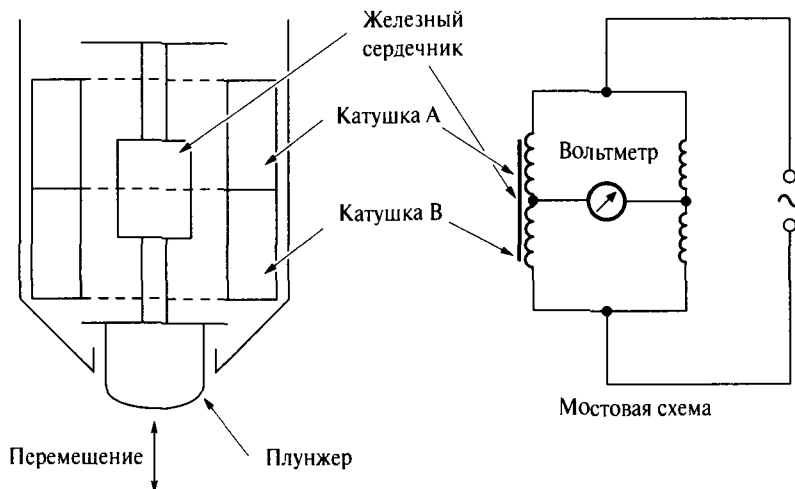


Рис. 8.12. Дифференциальный индуктивный преобразователь

Индуктивность каждой катушки зависит от длины части сердечника, находящегося внутри нее. Когда сердечник располагается так, что внутри каждой катушки он имеет участок одинаковой длины, индуктивность обеих катушек будет равна. Любое движение якоря вызывает в одной из катушек увеличение индуктивности, а в другой — ее уменьшение. Таким образом, по величине разности значений индуктивности двух катушек можно определять величину перемещения стержня.

12. Перестраиваемый дифференциальный трансформатор

Линейно перестраиваемый дифференциальный трансформатор (ЛПДТ) — это трансформатор с одной первичной обмоткой и двумя вторичными обмотками (Рис. 8.13). Обе вторичные обмотки соединены последовательно так, что их выходные сигналы направлены навстречу друг другу. Переменное напряжение поступает на первичную обмотку и наводит переменную э.д.с. во вторичных обмотках. Обе вторичные обмотки идентичны, поэтому, когда сердечник находится в центральном положении, т.е. в каждой вторичной обмотке расположены его части равной длины, э.д.с., наведенные в них, будут одинаковы. Но так как они соединены противоположно друг другу, результирующий выходной сигнал оказывается равным нулю. Изменение положения сердечника приведет к тому, что в обмотках будут находиться его участки разной длины. Как результат, наведенная э.д.с. в одной из обмоток становится больше, чем в другой, и появляется ненулевой выходной сигнал.

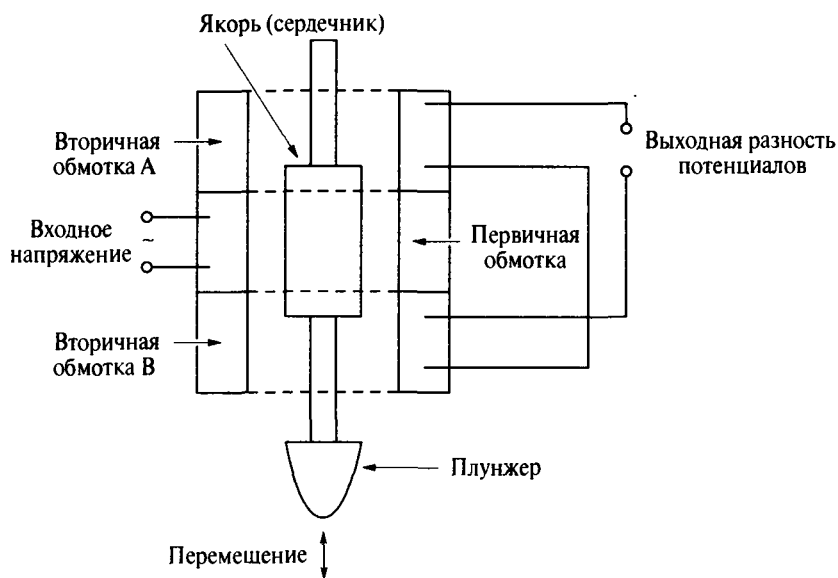


Рис. 8.13. Линейно перестраиваемый дифференциальный трансформатор

Для синусоидального входного напряжения э.д.с. в двух вторичных обмотках можно представить в виде:

$$\begin{aligned} V_A &= k_A \sin(\omega t - \Phi), \\ V_B &= k_B \sin(\omega t - \Phi), \end{aligned}$$

где величины k_A и k_B зависят от степени взаимосвязи между первичной и вторичными обмотками для конкретного положения сердечника, Φ — это разность фаз между напряжением в первичной и вторичных обмотках. Таким образом, выходной сигнал V_0 будет равен:

$$V_0 = V_A - V_B = (k_A - k_B) \sin(\omega t - \Phi),$$

Когда сердечник находится в среднем положении с равным вхождением в каждую обмотку, k_A равно k_B , и V_0 равно нулю. Когда сердечник вдвигается в обмотку А больше, чем в обмотку В, то $k_A > k_B$, когда вдвигается больше в В, чем в А, то $k_A < k_B$.

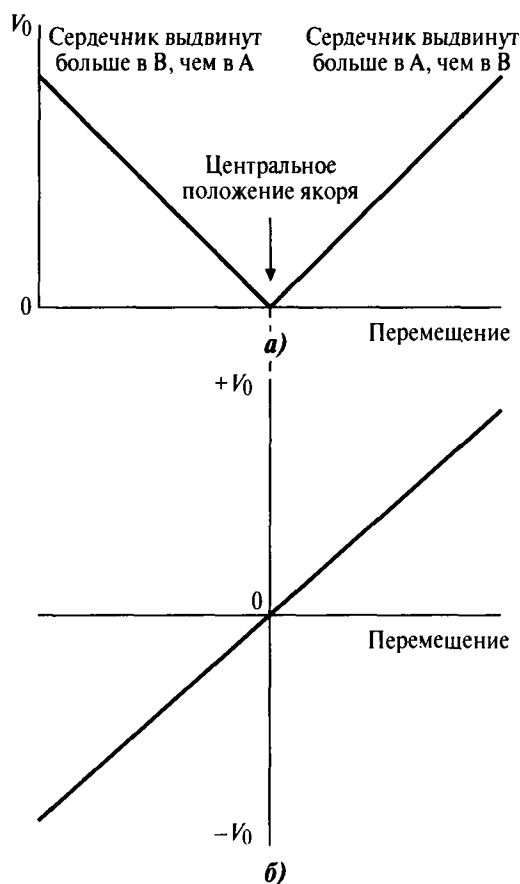


Рис. 8.14. ЛПДТ: а — характеристики по переменному току;
б — характеристики по постоянному току

Следствием этого является переворот фазы на 180° в выходном сигнале при переходе середины сердечника через среднюю точку между обмотками А и В.

$$\text{Для } k_A > k_B \quad V_0 = (k_A - k_B) \sin(\omega t - \Phi),$$

$$\text{для } k_A < k_B \quad V_0 = -(k_A - k_B) \sin(\omega t - \Phi) = (k_B - k_A) \sin(\omega t + (\pi - \Phi)).$$

Таким образом, характеристики выходного сигнала по переменному току могут быть представлены в виде, показанном на **Рис. 8.14а**. Выходное напряжение может быть преобразовано в постоянное напряжение с учетом разности фаз. Тогда характеристики по постоянному току такого преобразованного сигнала будут иметь вид, показанный на **Рис. 8.14б**. Обе характеристики приведены для идеального случая, так как на самом деле существуют некоторые неизбежные нелинейности вблизи обоих крайних положений при перемещении сердечника. ЛПДТ используют для измерения перемещений в диапазоне 0.25...250 мм.

13. Сельсин

Сельсин, или позиционный двигатель переменного тока, состоит из трех статорных обмоток, размещенных по окружности в корпусе через 120° . Внутри этого корпуса размещается ротор (**Рис. 8.15**). При протекании переменного тока через роторную обмотку в каждой вторичной обмотке наводится э.д.с., что приводит к появлению сигнала на выходе устройства. Соотношение между выходными сигналами от всех трех статорных обмоток зависит от углового положения ротора.

Сельсины обычно используются парами (**Рис. 8.16**). Один работает как передатчик, другой как приемник. Когда роторы двух сельсинов находятся в одинаковом угловом положении относительно их статорных обмоток, наведенные э.д.с. в соответствующих обмотках будут одинаковы, и не будет разности потенциалов между соответствующими парами. Следовательно, в цепи попарно соединенных статорных обмоток тока также не будет. Однако если угловые положения роторов двух сельсинов не совпадают, то наведенные э.д.с. в соответствующих парах катушек не будут равны. В этом случае между обмотками течет ток и создает магнитные поля, которые, в свою очередь, создают, силы, действующие на роторы, заставляющие их занять одинаковое положение. Таким образом, движение ротора в одном сельсине приводит во вращение ротор другого сельсина, устанавливая его в то же самое угловое положение. Значит, при помощи сельсинов можно связать механическое вращение оси задающего ротора с вращением ротора при-

нимающего, находящегося на некотором удалении. В результате чего приемный ротор начинает передвигать указатель на шкале. Изменение углового положения оси, переданное сельсином, приводит к соответствующему изменению углового положения указателя на шкале.

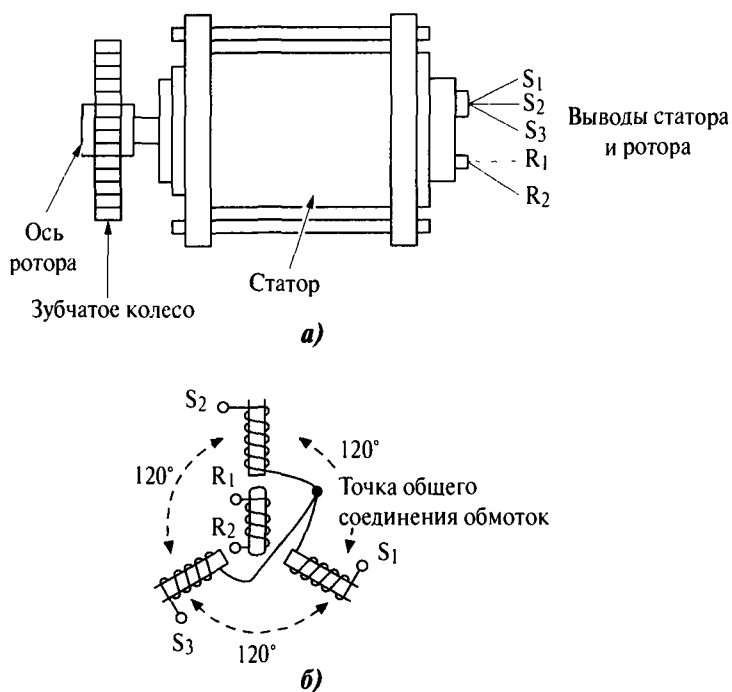


Рис. 8.15. Сельсин: а — внешний вид; б — внутреннее устройство

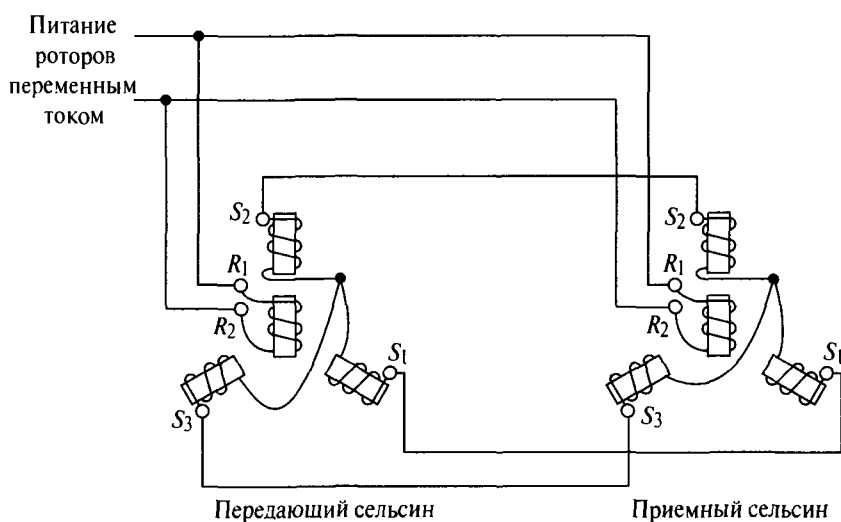


Рис. 8.16. Связь передающего и приемного сельсина

Термоэлектрические датчики

14. Термопары

На соединении между двумя разными металлами существует разность потенциалов. Величина этой разности потенциалов зависит от используемых металлов и температуры соединения. Термопара — это как раз и есть соединение двух различных металлических проводников в замкнутую цепь (**Рис. 8.17**). Когда оба соединения находятся при одинаковой температуре, разность потенциалов по каждому соединению также одинакова, и результирующая э.д.с. равна нулю. При различной температуре двух соединений, однако, возникает не равная нулю результирующая э.д.с.. Величина этой э.д.с. зависит от типа двух металлов и температур обоих соединений. Обычно одно соединение поддерживается при температуре 0°C . Тогда

$$\text{э.д.с. } E = a_1\theta + a_2\theta^2 + a_3\theta^3 + \dots,$$

где $a_1, a_2, a_3, \dots$ — постоянные коэффициенты при $a_1 > a_2 > a_3$ и θ — температура в $^{\circ}\text{C}$. На **Рис. 8.18** показано, как изменяются с температурой э.д.с. термопар для ряда металлов, если одно из соединений поддерживается при температуре 0°C . Существуют специальные таблицы, дающие значения э.д.с. термопар при различных температурах для металлов, наиболее часто используемых в термопарах. Так, в **Табл. 8.4** приведен список наиболее распространенных термопар и их обозначения. В **Табл. 8.5** представлены термо э.д.с. различных типов термопар.

Табл. 8.4. Термопары

Тип материала	Диапазон температур [$^{\circ}\text{C}$]	Чувствительность [мкВ/ $^{\circ}\text{C}$] в диапазоне $0\ldots 100^{\circ}\text{C}$
E Хромель — константан	$-200\ldots 980$	63
J Железо — константан	$-200\ldots 850$	53
K Хромель — алюмель	$-200\ldots 1300$	41
N Ниросил — нисил	$-200\ldots 1300$	28
R Платина — платина/родий 13%	$0\ldots 1400$	6
S Платина — платина/родий 10%	$0\ldots 1400$	6
T Медь — константан	$-200\ldots 370$	43

Примечание. Диапазоны температур представлены для условий длительного применения.

В таблице подразумевается, что температура одного из соединений термопары равна 0°C . Если же это условие не выполняется, то для определения величины э.д.с. применяется **Правило промежуточной температуры**. Оно гласит, что э.д.с. термопары, у которой спаи находятся при температурах θ_1 и θ_3 , равна алгебраической сумме э.д.с. двух термопар из тех же материалов со спаями при температурах θ_1 и θ_2 , и θ_2 и θ_3 .

Таким образом, э.д.с. термопары при температуре θ , когда холодный спай находится при температуре 0°C , равна сумме э.д.с. термопары при температуре θ с холодным спаем при некоторой другой температуре и э.д.с. термопары при этой другой температуре с холодным спаем при 0°C .

Для тех случаев, когда сравнительный (холодный) спай не поддерживается при постоянной температуре, а меняется в соответствии с окружающими условиями, может использоваться компенсационная схема. Такая схема должна создавать разность потенциалов, равную э.д.с., которая генерировалась бы термопарой, у которой один спай находился бы при 0°C , а другой — при окружающей температуре. Это можно реализовать при использовании термосопротивления, включенного в мост Уитстона.

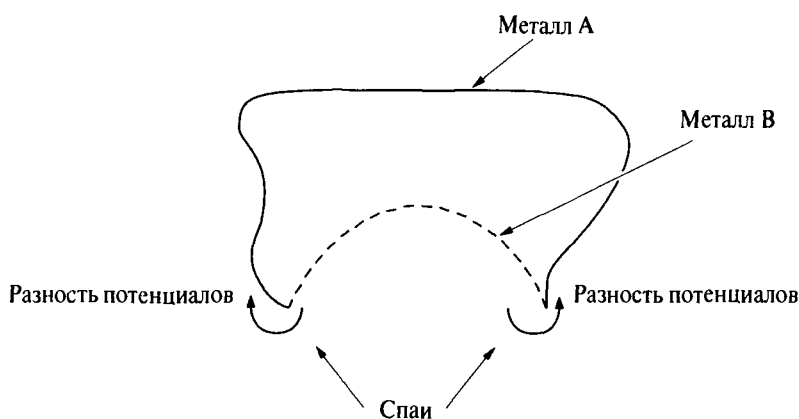


Рис. 8.17. Термопара

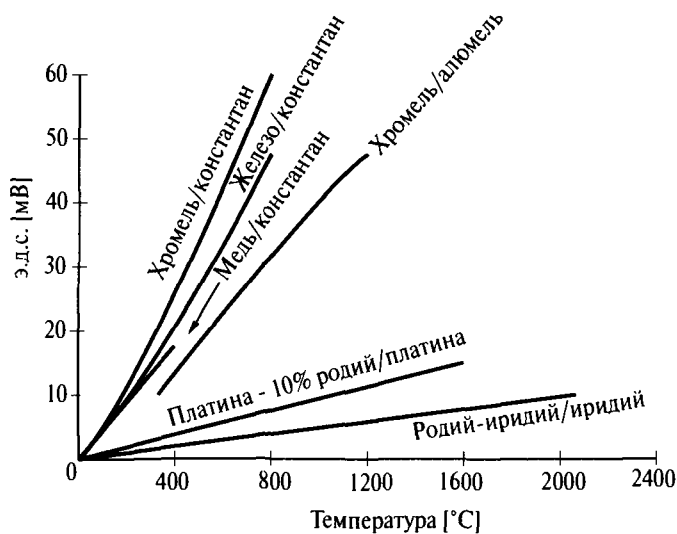


Рис. 8.18. Графики зависимости термоэлектрической э.д.с. от температуры

Табл. 8.5. Термоэлектрические э.д.с. при температуре эталонного спая 0°C

Температура [°C]	э.д.с. термопары в [мВ]						
	E	J	K	N	R	S	T
-260	-9.795		-6.441	-4.336			
-240	-0.604		-6.344	-4.277			
-220	-9.274		-6.158	-4.162			-5.891
-200	-8.824	-7.890	-5.891	-3.990			-5.603
-180	-8.273	-7.402	-5.550	-3.766			-5.261
-160	-7.631	-6.821	-5.141	-3.491			-4.865
-140	-6.907	-6.159	-4.669	-3.170			-4.419
-120	-6.107	-5.426	-4.138	-2.807			-3.923
-100	-5.237	-4.632	-3.553	-2.407			-3.378
-80	-4.301	-3.785	-2.920	-1.972			-2.788
-60	-3.306	-2.892	-2.243	-1.509			-2.152
-40	-2.254	-1.960	-1.527	-1.023		-0.194	-1.475
-20	-1.151	-0.995	-0.777	-0.518		-0.103	-0.757
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20	1.192	1.019	0.798	0.525	0.112	0.113	0.789
40	2.419	2.058	1.611	1.064	0.246	0.235	1.611
60	3.683	3.115	2.436	1.619	0.363	0.365	2.467
80	4.983	4.186	3.266	2.188	0.500	0.502	3.357
100	6.317	5.268	4.095	2.774	0.645	0.645	4.277
120	7.683	6.359	4.919	3.374	0.798	0.795	5.227
140	9.078	7.457	5.733	3.988	0.957	0.950	6.204
160	10.501	8.560	6.539	4.617	1.121	1.109	7.207
180	11.949	9.667	7.338	5.258	1.290	1.273	8.235
200	13.419	10.777	8.137	5.912	1.465	1.440	9.286
220	14.909	11.887	8.938	6.577	1.643	1.611	10.360
240	16.417	12.998	9.745	7.254	1.826	1.785	11.456
260	17.942	14.108	10.560	7.940	2.012	1.962	12.572
280	19.481	15.217	11.381	8.636	2.202	2.141	13.707
300	21.033	16.325	12.207	9.340	2.395	2.323	14.860
320	22.597	17.432	13.039	10.053	2.591	2.506	16.030
340	24.171	18.537	13.874	10.772	2.790	2.692	17.217
360	25.754	19.640	14.712	11.499	2.991	2.880	18.420
380	27.345	20.743	15.552	12.233	3.194	3.069	19.638
400	28.943	21.846	16.395	12.972	3.399	3.260	20.869
420	30.546	22.949	17.241	13.717	3.607	3.452	
440	32.155	24.054	18.088	14.467	3.817	3.645	
460	33.767	25.161	18.938	15.222	4.029	3.840	
480	35.382	26.272	19.788	15.981	4.241	4.036	
500	36.999	27.388	20.640	16.744	4.455	4.234	
550	41.045	30.210	22.772	18.668	5.004	4.732	
600	45.085	33.096	24.902	20.609	5.563	5.237	
650	49.109	36.066	27.022	22.564	6.137	5.751	
700	53.110	39.130	29.128	24.526	6.720	6.274	

Табл. 8.5 (окончание)

Температура [°C]	э.д.с. термопары в [мВ]						
	E	J	K	N	R	S	T
750	57.083	42.283	31.214	26.491	7.315	6.805	
800	61.022	45.498	33.277	28.456	7.924	7.345	
850	64.924	48.717	35.314	30.417	8.544	7.892	
900	68.783	51.875	37.325	32.370	9.175	8.448	
950	72.593	54.949	39.310	34.315	9.816	9.012	
1000	76.357	57.942	41.269	36.248	10.471	9.585	
1050		60.877	43.202	38.169	11.138	10.165	
1100		63.777	45.108	40.076	11.817	10.754	
1150		66.664	48.985	41.966	12.503	11.348	
1200		69.536	48.828	43.836	13.193	11.947	
1250			50.633	45.682	13.889	12.550	
1300			52.398	47.502	14.582	13.156	
1350			54.125		15.276	13.761	
1400					15.969	14.368	
1450					16.663	14.973	
1500					17.536	15.576	
1550					18.043	16.176	
1600					18.727	16.771	
1650					19.409	17.360	
1700					20.090	17.942	
1750						18.504	

Мост балансируется при температуре 0°C и создает разность потенциалов разбаланса, дающую возможность корректировать разность потенциалов термопары при произвольных температурах.

Для термометра сопротивления справедливо:

$$R_{\theta} = R_0 (1 + \alpha \theta),$$

где R_{θ} — сопротивление при температуре θ , R_0 — сопротивление при 0°C, а α — температурный коэффициент сопротивления. Следовательно,

$$\text{Изменение сопротивления} = R_{\theta} - R_0 = R_0 \alpha \theta.$$

Разница потенциалов разбаланса δV_0 моста Уитстона с элементом такого сопротивления в одном из плеч и переменным резистором R_2 в другом плече может быть определена как (см. главу 9):

$$\delta V_0 = \frac{V_s R_0 \alpha \theta}{R_0 + R_2},$$

где V_s — напряжение питания моста. Если э.д.с. E термопары изменяется с температурой θ по закону, который можно представить в виде: $E = a\theta$, где a — константа, соответствующая э.д.с.,

создаваемой на один градус изменения температуры, то для момента компенсации справедливо:

$$a\theta = \frac{V_s R_0 \alpha \theta}{R_0 + R_2},$$
$$\frac{R_2}{R_0} = \frac{V_s \alpha - a}{a}.$$

Правило промежуточного металла может быть сформулировано так: термопарная цепь может иметь в своем составе проводник из другого металла, который не будет оказывать воздействие на термоэлектрическую э.д.с., если все промежуточные соединения находятся при одинаковой температуре.

Пьезоэлектрические датчики

15. Пьезоэлектрический датчик силы

Когда некоторые кристаллы подвергаются деформации под действием сил сжатия или растяжения, на их противоположных поверхностях появляется разность электрических зарядов. Этот эффект называется *прямым пьезоэффектом*. Примерами таких кристаллов являются кварц, турмалин и пьезоэлектрические керамики, такие как цирконат-титанат свинца.

Заряд, образующийся на поверхности пьезоэлектрического кристалла, будет прямо пропорциональным приложенной силе:

Чувствительность пьезокристалла $d = \frac{\text{заряд } q}{\text{сила } F}.$

Чтобы измерить заряд, на противоположные поверхности кристалла методом осаждения наносятся электроды. Такое устройство образует конденсатор, и, таким образом, пьезоэлектрический датчик может рассматриваться как генератор зарядов с параллельно включенным конденсатором. В Табл. 8.6 представлены характеристики для наиболее часто используемых пьезоэлектрических кристаллов.

Табл. 8.6. Пьезоэлектрические кристаллы

Материал	Чувствительность по заряду [пКл/Н]	Относительная диэлектрическая проницаемость
Метаниабат свинца	80	250
Цирконат-титанат свинца	250	1500
Кварц	2.3	4.5
Турмалин	1.9 или 2.4*	6.6

* Величина зависит от направления приложенной силы относительно осей кристалла.

Когда нагрузка, т.е. регистратор, подключена к пьезоэлектрическому датчику, разность потенциалов на нагрузке определяется не только чувствительностью датчика, но и его емкостью, а также емкостью самой нагрузки и соединительных проводов. По этой причине пьезоэлектрические датчики часто подключают к нагрузке через электрометрические усилители. С такими устройствами разность потенциалов (Р.П.) на нагрузке определяется только чувствительностью датчика и входной емкостью электрометрического усилителя. Статическая передаточная функция системы в этом случае определяется как:

$$\begin{aligned} \text{Статическая передаточная функция} &= \\ &= \frac{\text{изменение Р.П. на нагрузке } \Delta V_L}{\text{изменение силы } \Delta F} = \\ &= \frac{\text{чувствительность } d}{\text{входная емкость усилителя } C_A}. \end{aligned}$$

Динамическая передаточная функция описывается уравнением второго порядка:

$$\frac{\Delta V_L}{\Delta F}(s) = \frac{(d/C_A)}{(1/\omega_n^2)s^2 + (2\zeta/\omega_n)s + 1},$$

где ω_n — собственная частота и ζ — коэффициент затухания. Типичные значения для ω_n — около 100 кГц, а для ζ — около 0.01.

Пьезоэлектрические датчики применяются для измерения силы, давления, ускорения и вибрации. При измерении ускорения или вибрации в состав датчика входит масса m , которая соединяется с поверхностью пьезоэлектрического кристалла при помощи упругого элемента. Когда возникает ускорение, масса своей инерцией воздействует на кристалл с силой $F = ma$. Так как для кристалла справедливо:

$$\text{Чувствительность} = \frac{\text{изменение заряда}}{\text{изменение силы}},$$

то можно записать:

$$\text{Чувствительность} = \frac{\text{изменение заряда}}{\text{масса} \times \text{изменение ускорения}},$$

Для динамических условий система является системой второго порядка, описанной ранее.

16. Пьезоэлектрический ультразвуковой генератор

Возможен также обратный пьезоэлектрический эффект, т.е. разность потенциалов, приложенная к поверхностям кристалла, создает на его противоположных гранях заряды, под действием которых кристалл сжимается или расширяется. При использовании разности потенциалов переменного тока высокой частоты кристалл будет создавать высокочастотные механические колебания. Эти колебания, в свою очередь, будут создавать волны давления в среде у поверхности кристалла. На этом принципе основан ультразвуковой генератор.

Фотоэлектрические датчики

17. Фотодиоды

Фотодиод — это обычный диод в корпусе, в котором имеется окошко, позволяющее свету попадать на полупроводниковое соединение. Если такой диод включить в цепь в обратной полярности, то ток, протекающий через него, будет пропорционален интенсивности света, падающего на полупроводниковое соединение. Выходной сигнал, как правило, снимается в виде разности потенциалов на резисторе, включенном последовательно с диодом (Рис. 8.19). Фотодиоды имеют более низкую чувствительность к свету по сравнению с фоторезисторами (см. п. 5 этой главы), но меньшие переходные времена. Кремниевые диоды являются наиболее эффективными на длинах волн около 0.8 мкм. Диоды на соединениях $GaAs$, $GaInAsP$, $CdTe$ работают на длинах волн 1.1...1.5 мкм, а металл-полупроводниковые диоды, такие как $Ag-ZnS$ и $Au-Si$, — на длинах волн 0.3...0.7 мкм.

p-i-n-фотодиоды имеют широкий слой чувствительного материала между *p*- и *n*-типами веществ в соединении, и такие диоды обладают очень малыми временами реакции, порядка наносекунд. ***Лавинные фотодиоды*** работают при высоких обратных смещениях и тоже обладают малыми временами реакции.

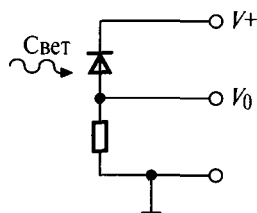


Рис. 8.19. Включение фотодиода

18. Фотозмиссионные приборы

При попадании света на некоторые материалы может происходить эмиссия электронов. На этом принципе основан **вакуумный фотозмиссионный элемент**, который состоит из светочувствительного материала в форме полуцилиндра, используемого как катод, и стержневого анода в вакуумной трубке (Рис. 8.20а). На аноде поддерживается положительный потенциал относительно катода. Между анодом и катодом возникает электрический ток, который определяется интенсивностью света, падающего на катод. Материалы, которые используются для изготовления фотокатодов, определяют чувствительность прибора и длины волн, на которые он реагирует. Обычно используют материалы, относящиеся к двойным щелочам, сформированные из калия и цезия или натрия и калия. Такие материалы чувствительны к длине волн в диапазоне 200...700 нм.

Фотоумножитель (Рис. 8.20б) имеет полупрозрачный фотокатод. Электроны, испускаемые этим катодом, фокусируются на первом диноде, на котором поддерживается положительный по-

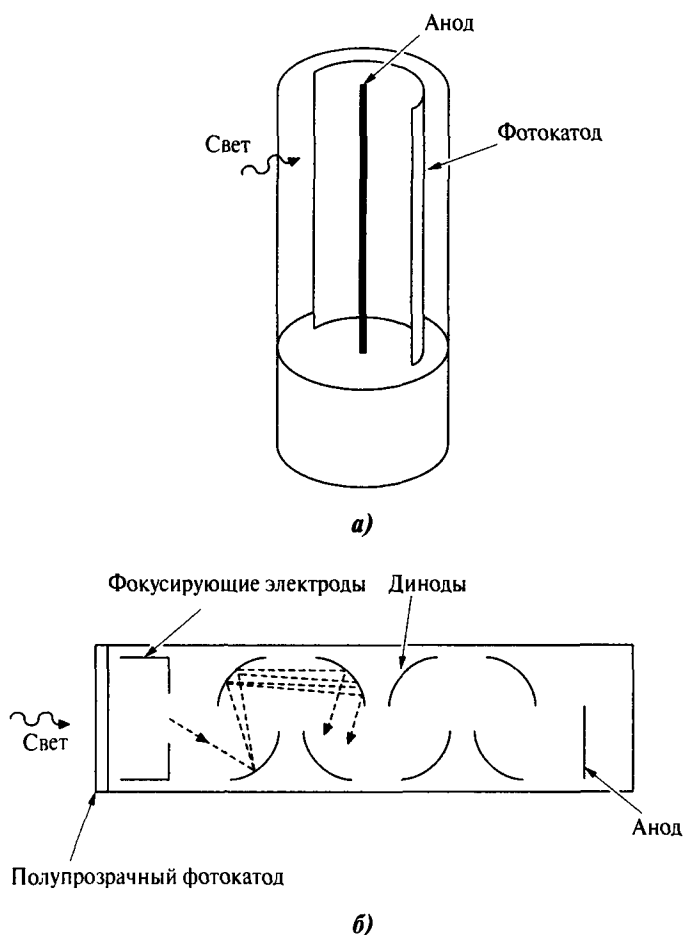


Рис. 8.20. а — фотозмиссионный элемент; б — фотоумножитель

тенциал по отношению к катоду. Динод покрыт такими материалами, как BeO , $CsSb$ или GaP . Электроны, ударяясь о динод, вызывают вторичную эмиссию с еще большим количеством эмитированных электронов. Для GaP на каждый ударяющийся о динод электрон может быть эмитировано 50 электронов. Те затем направляются ко второму диноду, где еще больше усиливают эмиссию электронов. Окончательно после ряда таких столкновений с динодами электроны достигают анода. Следствием этого является большое внутреннее усиление. Фотоумножители могут использоваться для определения очень низких уровней освещенности.

Электрохимические датчики

19. Ион-селективные электроды

Если ион-селективный электрод поместить в раствор, то на его выходе появится сигнал, который зависит в основном от концентрации конкретного типа ионов в растворе. На **Рис. 8.21а** по-

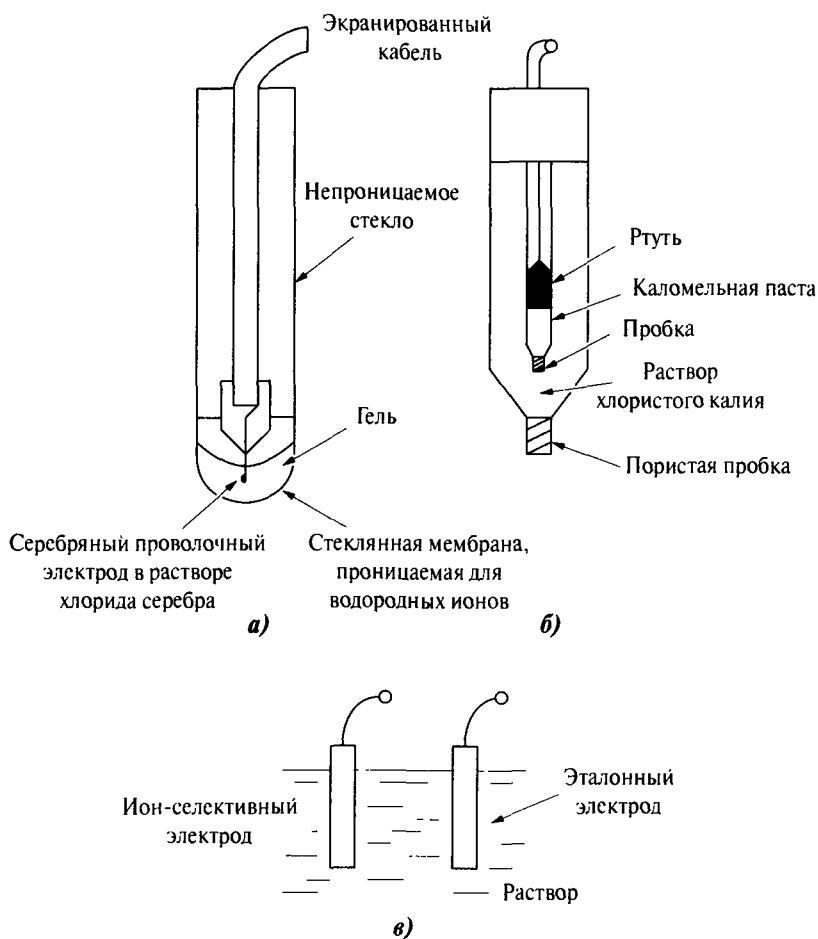


Рис. 8.21. а — ион-водородный электрод; б — стандартный каломелевый электрод; в — базовая схема измерений

казан такой электрод, который реагирует только на ионы водорода. Ион-селективный электрод используется совместно с соответствующим стандартным эталонным электродом, и разность потенциалов между ними измеряется либо вольтметром с высоким входным импедансом, либо предварительно усиливается буферным усилителем также с высоким входным импедансом. Наиболее часто используемым стандартным электродом является каломелевый электрод (**Рис. 8.21б**).

Определение концентраций водородных ионов в растворе используется для того, чтобы измерить степень кислотности или щелочности растворов по шкале pH.

$$pH = \lg \left(\frac{1}{\text{концентрация водородных ионов}} \right)$$

Значение pH, равное 7, соответствует нейтральной среде, $pH > 7$ — щелочной, а $pH < 7$ — кислотной.

Датчики упругости

Преобразователи упругости можно рассматривать по их реакции как системы типа «масса—упругость—демпфер» (см. главу 4), описываемые передаточными функциями второго порядка.

20. Измерительное кольцо

Измерительное кольцо — это стальное кольцо, которое под действием сил деформируется от своей исходной круглой формы. Величина деформации является мерой приложенных к кольцу сил и может быть измерена стрелочным микрометром, как это показано на **Рис. 8.22**, или при помощи тензометрических датчиков деформации, прикрепленных на кольцо. Измерительные кольца способны обеспечить высокую точность и используются для измерения сил в диапазоне 2...2000 кН.

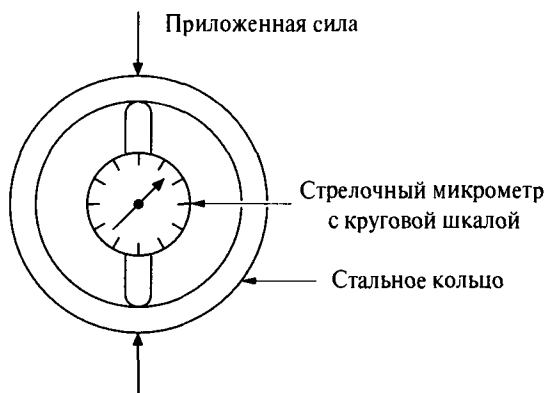


Рис. 8.22. Измерительное кольцо

21. Динамометрические элементы

Деформация цилиндра или втулки под действием внешних сил может использоваться как средство для измерения этих сил. Такая система, известная как **динамометрический элемент**, показана на **Рис. 8.23**. Обычно такие устройства используются для измерения сил в диапазоне 500 Н...6000 кН.

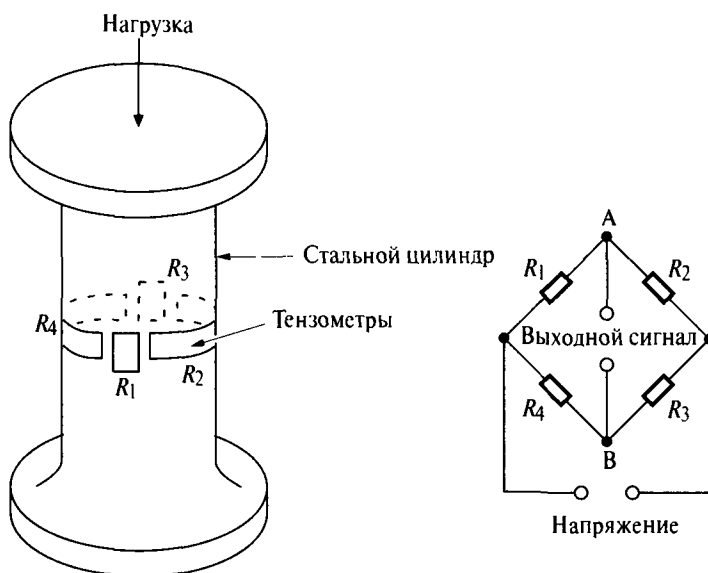


Рис. 8.23. Динамометрический элемент

Деформация динамометрического элемента часто измеряется при помощи тензометрических датчиков (см. выше в этой главе). Как правило, используются четыре идентичных тензометра, каждый из которых образует одно из плеч моста Уитстона. Если динамометрический элемент подвергается сжатию, то тензометры R_1 и R_3 также сжимаются. Величину деформации можно определить как $-(F/AE)$, где F — приложенная к элементу сила, A — площадь поперечного сечения элемента, а E — модуль упругости материала элемента. Тензометры R_2 и R_4 также деформируются. Их деформация равна $+(vF/AE)$, где v — коэффициент Пуассона для материала, из которого изготовлен данный элемент. Первоначально все тензометры имеют одинаковую величину сопротивления R . Нагружение датчика приведет к изменению значений сопротивлений, т.е.

$$R_1 = R_3 = R - \frac{RGF}{AE},$$

$$R_2 = R_4 = R + \frac{RGvF}{AE}.$$

Здесь G — тензометрический коэффициент. Разность потенциалов разбалансировки моста можно определить как (см. главу 9):

$$E_{Th} = V_s \left(\frac{R_1}{R_1 + R_4} - \frac{R_2}{R_2 + R_3} \right) = V_s \left[\frac{(1 - GF/AE) - (1 + GvF/AE)}{(1 - GF/AE) + (1 + GvF/AE)} \right].$$

Так как $(GF/AE) \ll 1$, то $E_{Th} = \frac{V_s GF}{2AE} (1 + \nu)$.

Применение четырех идентичных тензометров устраняет эффект влияния температуры, так как каждое плечо моста подвергается равному воздействию при температурных изменениях.

22. Мембраны (диафрагмы)

При воздействии на круглую мембрану перепада давления между двумя ее сторонами произойдет смещение ее центра. На этом принципе и основаны датчики давления (Рис. 8.24). Величина смещения плоской мембраны довольно ограничена. Однако можно получить большие смещения при использовании гофрированных мембран.

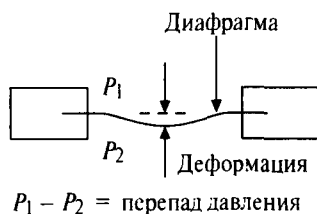


Рис. 8.24. Мембранный датчик

23. Капсулы и сильфоны

Капсулы (Рис. 8.25) могут рассматриваться как сложенные друг с другом две мембраны, а сильфоны — как стопка таких капсул, что повышает их эффективность.

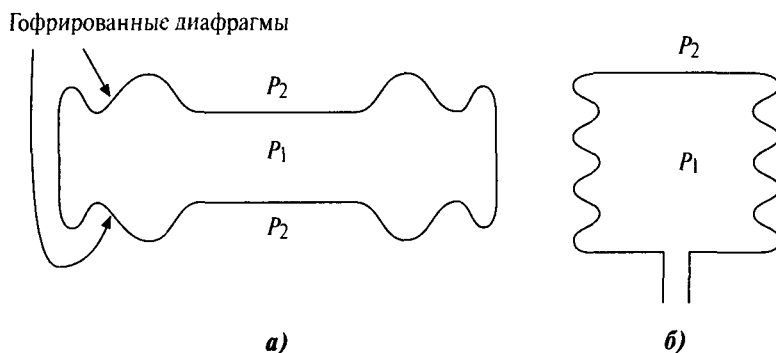


Рис. 8.25. а — капсула, б — сильфон

24. Трубки Бурдона

Трубки Бурдона — это трубки с поперечным сечением почти прямоугольной или эллиптической формы, выполненные из материалов типа нержавеющей стали или фосфористой бронзы. По форме эти трубки изгибаются в виде буквы «С» (**Рис. 8.26а**). Когда давление внутри трубки увеличивается, то С-форма раскрывается и, таким образом, происходит перемещение закрытого конца такой С-трубки. Это дает возможность измерять давление. Спиральная форма трубки **Рис. 8.26б** позволяет получить большие смещения ее конца. В другом варианте трубка закручивается винтом **Рис. 8.26в**, и изменение давления приводит к ее раскручиванию

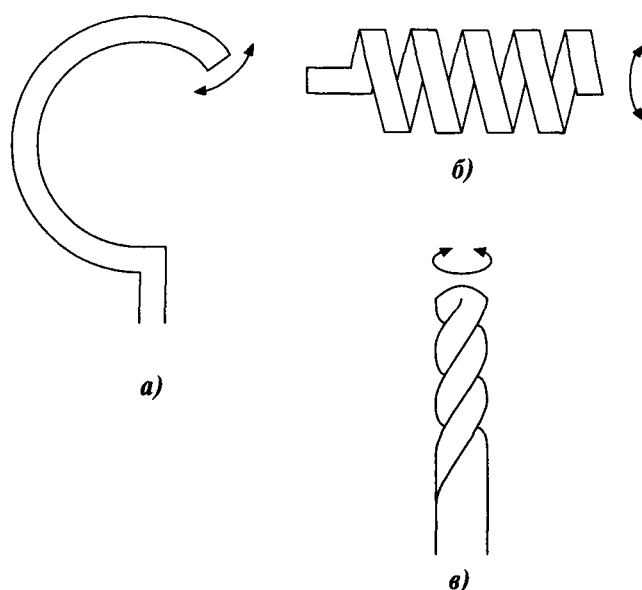


Рис. 8.26. Формы трубок Бурдона

Пневматические датчики

25. Сопло с регулируемой заслонкой

На **Рис. 8.27** показано устройство пневматического датчика с регулируемым соплом. Воздушное питание датчика обеспечивается постоянным давлением P_s , которое должно быть выше атмосферного. Поток воздуха проходит через диафрагму и истекает через сопло в атмосферу. Когда заслонка закрывает сопло, что соответствует положению $x = 0$, тогда истечение воздуха прекращается, и давление P между диафрагмой и соплом становится равным P_s . При увеличении величины x давление падает. Таким образом, по изменению давления можно определять величину перемещения заслонки.

Соотношение между давлением P и перемещением x является нелинейным и задается выражением:

$$P = \frac{P_s}{1 + 16(d_n^2 x^2 / d_0^4)},$$

где d_n — диаметр сопла, d_0 — диаметр диафрагмы. Такой датчик имеет высокую чувствительность, но малый диапазон измерений, обычно ± 0.05 мм.

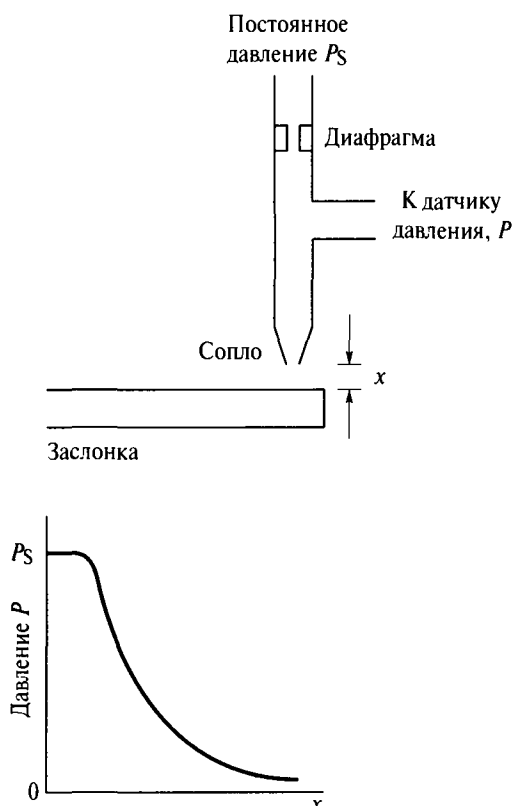


Рис. 8.27. Сопло с регулируемой заслонкой

Дифференциальные датчики давления

26. Расходомеры

Когда жидкость перетекает из трубки широкого диаметра в трубку узкого диаметра, ее скорость увеличивается, а давление падает. Если жидкость несжимаемая, т.е. плотность ее не изменяется при изменении давления, то справедливо уравнение Бернулли для горизонтальной трубки:

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g},$$

где v_1 — скорость жидкости в трубке широкого диаметра, P_1 — давление в трубке широкого диаметра, v_2 — скорость жидкости в месте сужения, P_2 — давление в месте сужения, а ρ — плотность

жидкости. Масса протекающей жидкости через широкую часть трубки в секунду должна равняться массе, протекающей в секунду через узкую секцию. Следовательно, так как плотность не изменяется, объем жидкости Q , проходящей через широкую секцию, должен равняться объему жидкости, проходящему через суженную часть. Следовательно,

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2,$$

где A_1 — площадь поперечного сечения трубки, A_2 — площадь поперечного сечения в месте сужения. Отсюда:

$$Q = \frac{A_2}{\sqrt{[1 - (A_2/A_1)^2]}} \sqrt{[2(P_1 - P_2)/\rho]}.$$

На практике, так как поток жидкости не является идеальным невязким и площадь поперечного сечения для движущейся жидкости может не совпадать с сечением трубки, приведенное выше уравнение является только приближенным и должно быть уточнено при помощи поправочного коэффициента C :

$$Q = \frac{CA_2}{\sqrt{[1 - (A_2/A_1)^2]}} \sqrt{[2(P_1 - P_2)/\rho]}.$$

Существует много видов расходомеров, основанных на измерении разности давлений между потоками в широкой и узкой секциях труб, которые отличаются способами реализации узкого сечения.

Расходомер переменного сечения конструируется на том же принципе, который описан выше, но вместо измерения перепада давления между широкой и узкой секциями труб варьируется поперечный размер узкой секции таким образом, чтобы обеспечить постоянный перепад давления.

Механические датчики

27. Турбинный расходомер

Турбинный расходомер (**Рис. 8.28**) состоит из многолопаточного ротора, ось которого монтируется вдоль оси трубы, в которой течет жидкость. Угловая скорость ω вращения ротора пропорциональна объемному расходу жидкости Q , т.е. можно записать:

$$\omega = k \cdot Q,$$

где k — константа, зависящая от формы лопастей ротора. Скорость кругового вращения ротора может быть определена при помощи индукционного тахогенератора (см. пункт 10 этой главы). Таким образом, полученное на тахогенераторе значение переменной э.д.с. E будет определяться выражением:

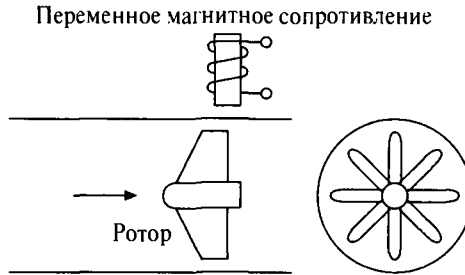


Рис. 8.28. Турбинный расходомер

$$E = N\Phi_{\alpha}n\omega \sin n\omega t = N\Phi_{\alpha}nkQ \sin nkQt.$$

Следовательно, переменная э.д.с. имеет амплитуду, равную $N\Phi_{\alpha}nkQ$, и частоту $(nkQ/2\pi)$. Указанные переменные описаны в пункте 10.

28. Дискретный датчик положения оси

Угловое положение оси можно определить при помощи дискретного датчика положения оси. Он состоит из диска, который вращается вместе с осью. Форма диска определяется применяемым видом датчика. В одном из видов диск имеет ряд отверстий, через которые может проходить луч света (**Рис. 8.29**). Луч света падает на светочувствительный датчик, который формирует электрический выходной сигнал. Вращение оси создает серию световых импульсов, которые преобразуются в электрические импульсы. Подсчитывая количество произведенных импульсов от некоторой начальной позиции, можно определить угловое положение оси. Если требуется получить скорость вращения оси, то определяется частота импульсов (их количество в секунду).

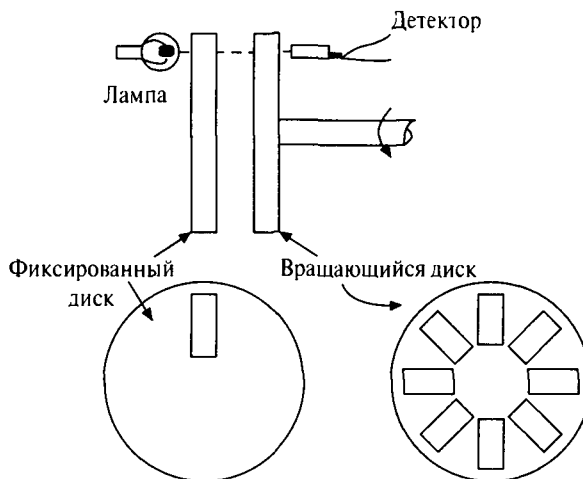


Рис. 8.29. Оптический дискретный датчик положения оси

29. Цифровой датчик положения оси

Для того, чтобы получить величину углового перемещения и, следовательно, угловое положение оси при помощи дискретного датчика, необходимо подсчитывать количество импульсов. Цифровой датчик положения оси, в отличие от дискретного, сам выдает выходной сигнал в виде двоичного кода. Каждому угловому положению оси соответствует свой собственный уникальный двоичный код. Таким образом, двоичное число на выходе датчика соответствует абсолютному значению углового положения оси. В оптической разновидности такого датчика (**Рис. 8.30**) вращающийся диск имеет четыре concentric circles с прорезями и четыре фотодатчика для регистрации пульсаций света. Прорези расположены таким образом, что последовательность выходных сигналов от фотодатчиков формирует число в двоичном коде, соответствующее положению оси.

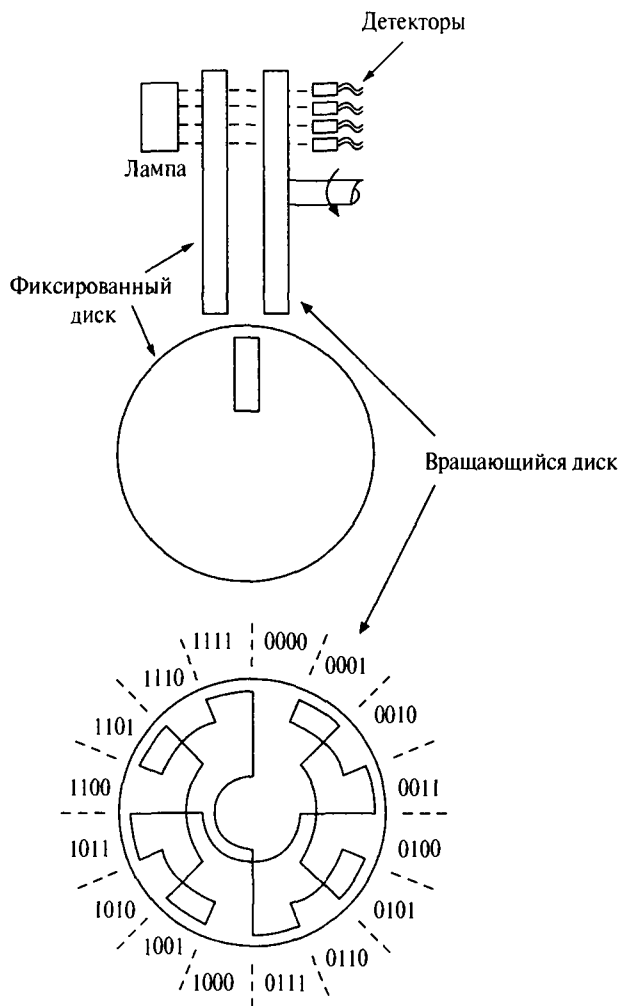


Рис. 8.30. Оптический датчик положения оси с кодирующим диском

В другой разновидности такого кодировщика используется диск из изоляционного материала, на котором имеется металлизированная сетка круговых сегментов, выполненных методом печатного монтажа. При помощи электрических щеток к этим сегментам подводится постоянное напряжение. Угловое положение вала определяется по коду, снимаемому на щетках. Электромагнитная разновидность такого датчика состоит из металлического диска, имеющего соответствующие кольцевые сектора с высокой и низкой магнитной проницаемостью материала. В этом случае для измерений используются индукционные тахогенераторы (см. пункт 10 этой главы).

На **Рис. 8.30** показан кодирующий диск, который выдает выходной сигнал в обычном двоичном коде. Однако может возникнуть проблема, если при вращении диска края различных окон не точно совпадают друг с другом. Любое такое несовпадение будет означать, что выходные сигналы от каждого кольцевого трека будут включаться в различные моменты времени, в результате чего в это время и будет появляться неправильное двоичное число. Чтобы избежать такого эффекта, добавляют еще один внешний трек, называемый синхронизирующим. Этот трек имеет маленькие окошки, которые позволяют выравнивать центры прорезей в других треках и указывают, когда информация внутренних треков должна быть считана. Альтернативный метод состоит в использовании специального вида двоичного кода, называемого *кодом Грея*. В этом коде изменяется только одна двоичная цифра при угловом перемещении диска на один шаг. В **Табл. 8.7** показана связь между числами в десятичных, обычных двоичных и кодах Грея.

Табл. 8.7. Представление чисел в десятичном, двоичном коде и коде Грея

Десятичный код	Двоичный код	Код Грея
0	0000	0000
1	0001	0001
2	0010	0011
3	0011	0010
4	0100	0110
5	0101	0111
6	0110	0101
7	0111	0100
8	1000	1100
9	1001	1101
10	1010	1111
11	1011	1110
12	1100	1010
13	1101	1011
14	1110	1001
15	1111	1000

Вибрационные датчики

30. Струнный вибрационный датчик силы

Частота f , с которой свободно вибрирует туго натянутая струна, задается формулой:

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{m}},$$

где L — длина колеблющейся струны, T — натяжение струны, m — масса струны на единицу ее длины. Эта зависимость является основой для построения датчиков силы или деформации. Струна зажимается на одном конце, а сила, которая должна быть измерена, прикладывается к другому ее концу. При изменении силы меняются натяжение струны и частота ее собственных колебаний. Эти изменения частоты могут быть определены при помощи датчиков переменного магнитного потока.

31. Вибрационные цилиндр или труба

Собственные частоты вибраций труб зависят от их массы на единицу длины и любой массы, которая прикреплена к колеблющейся трубе. Таким образом, частота колебаний трубы, через которую течет жидкость, будет зависеть от плотности этой жидкости и может быть использована для ее измерения.

9. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СИГНАЛОВ

В Табл. 9.1 представлена классификация преобразователей сигналов, обсуждаемых в этой главе, по виду их входных и выходных сигналов.

Табл. 9.1. Преобразователи сигналов

Вид сигнала		Преобразователь сигналов
Входной	Выходной	
Переменный ток или напряжение	Постоянный ток или напряжение	17
Переменное напряжение	Пропорционально уменьшенное переменное напряжение	18
Переменное напряжение	Модулированное напряжение	24
Аналоговый сигнал	Цифровой сигнал	25
Аналоговый сигнал	Выбранное и хранящееся значение	27
Угловое перемещение	Усиленное угловое перемещение	11
Угловое перемещение	Линейное перемещение	12
Емкость	Емкость/Сопротивление/Индуктивность	4
Емкость	Разность потенциалов	5, 6
Заряд	Разность потенциалов	13
Ток	Масштабированный ток	15, 19
Сигнал постоянного тока	Модулированный сигнал	23
Цифровой сигнал	Аналоговый сигнал	26
Перемещение	Усиленное перемещение	10
Э.д.с.	Линейное или угловое перемещение	7, 9
Частоты все	Частоты, полоса частот	21, 22
Индуктивность	Емкость/сопротивление/индуктивность	4
Индуктивность	Разность потенциалов	5, 6
Входы, многочисленные	Выбранный сигнал	28
Нелинейная разность потенциалов	Линейная разность потенциалов	14
Разность потенциалов	Линейное или угловое перемещение	7, 9
Разность потенциалов	Усиленная разность потенциалов	13
Разность потенциалов	Пропорционально уменьшенная разность потенциалов	18
Разность потенциалов	Масштабированная разность потенциалов	16, 19
Мощность	Масштабированная мощность	20
Сопротивление	Сопротивление	1, 3
Сопротивление	Разность потенциалов	2, 3
Термоэлектрическая э.д.с.	Линейное или угловое перемещение	8

Мосты Уитстона постоянного тока

1. Сбалансированный¹ мост

Сопротивления в плечах моста Уитстона (Рис. 9.1) подобраны так, что выходная разность потенциалов равна нулю, и гальванометр, подключенный к выходным клеммам, показывает нулевой ток. Такой мост называется сбалансированным¹. Когда это происходит, потенциал в точке В равен потенциалу в точке D. Это значит, что разность потенциалов между точками А и В должна быть равна разности потенциалов между точками А и D:

$$I_1 R_1 = I_2 R_3.$$

Соответственно разность потенциалов между точками В и С должна быть равна разности потенциалов между точками D и С. Так как при балансе ток между точками В и D отсутствует, то ток через резистор R_2 должен быть равен I_1 , а ток через резистор R_4 — I_2 .

Таким образом:

$$I_1 R_2 = I_2 R_4.$$

Следовательно:

$$I_1 R_1 = I_2 R_3 = [I_1 R_2 / R_4] R_3,$$

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}.$$

Сопротивление резистора R_1 должно быть таким образом подобрано по отношению к величине сопротивления R_2 , чтобы мост оказался сбалансированным при поддержании отношения R_3/R_4 на постоянном уровне.

Таким образом, значение сопротивления неизвестного резистора R_1 можно определить по величине сопротивления R_2 при его регулировке до достижения баланса моста, если соотношение R_3/R_4 остается постоянным.

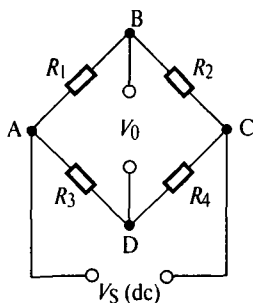


Рис. 9.1. Мост Уитстона

¹ В отечественной технической литературе мост называется *уравновешенным*, с обязательным балансом, т.е. выходной разностью потенциалов $V_0 = 0$ (прим. ред.).

2. Выходная разность потенциалов

Без нагрузки, т.е. при бесконечно большом сопротивлении между точками В и D моста Уитстона (**Рис. 9.1**), падение напряжения на резисторе R_1 — V_{AB} равно доле $R_1/(R_1+R_2)$ от напряжения питания V_s :

$$V_{AB} = \frac{V_s R_1}{R_1 + R_2}.$$

Аналогично разность потенциалов на резисторе R_3 , т.е. V_{AD} , равна:

$$V_{AD} = \frac{V_s R_3}{R_3 + R_4}.$$

Выходная разность потенциалов V_0 равна разности потенциалов между точками В и D:

$$V_0 = V_{AB} - V_{AD} = V_s \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right).$$

Это уравнение дает условие баланса моста, когда V_0 равно 0.

Соотношение между величиной сопротивления R_1 и выходным напряжением V_0 является нелинейным. Однако при больших значениях отношений R_3/R_4 и R_1/R_2 это соотношение приближается к линейному. Для величин с отношением, равным 10 и более, это соотношение приближенно может считаться линейным.

Изменение сопротивления от R_1 до $R_1 + \delta R_1$ дает изменение выходного напряжения от V_0 до $V_0 + \delta V_0$, следовательно, справедливо:

$$(V_0 + \delta V_0) - V_0 = V_s \left(\frac{R_1 + \delta R_1}{R_1 + \delta R_1 + R_2} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right).$$

Однако если δR_1 много меньше R_1 , то

$$\delta V_0 = \frac{V_s \delta R_1}{R_1 + R_2}.$$

При этих условиях изменение выходной разности потенциалов пропорционально изменению сопротивления R_1 .

Если же на выход моста подключена нагрузка с конечным сопротивлением R_L , то через нее потечет ток I_L . Этот ток может быть определен при помощи эквивалентной цепи (**Рис. 9.2**). Эквивалентное напряжение V_{Th} равно выходному напряжению V_0 открытой цепи, описанной выше. Таким образом:

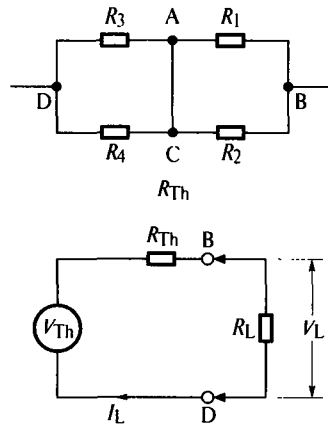


Рис. 9.2. Эквивалентная цепь нагруженного моста

$$V_{Th} = V_s \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right).$$

Эквивалентное сопротивление R_{Th} равно сопротивлению между точками В и D моста в предположении, что источник питания по постоянному току имеет пренебрежимо малое внутреннее сопротивление, следовательно:

$$R_{Th} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4}.$$

Ток через нагрузку I_L , таким образом, равен:

$$I_L = \frac{V_{Th}}{R_{Th} + R_L}.$$

Разность потенциалов на нагрузке V_L становится равной:

$$V_L = I_L R_L = \frac{V_{Th} R_L}{R_{Th} + R_L}.$$

3. Скомпенсированный¹ мост

При помощи использования либо трехпроводной, либо четырехпроводной схемы можно добиться компенсации температурных воздействий на величину сопротивления соединительных проводов при подключении к мосту термометра сопротивления (см. главу 21). На **Рис. 9.3** показан пример применения трехпроводной схемы. Компенсационный провод 1 включен последовательно с резистором R_3 , в то время как вывод 3 включен последовательно с платиновым резистором катушки R_1 . Вывод 2 соединен с источником пита-

¹ В отечественной технической литературе мост такого типа называют *неуравновешенным*, в котором измеряется его разбаланс (прим. ред.).

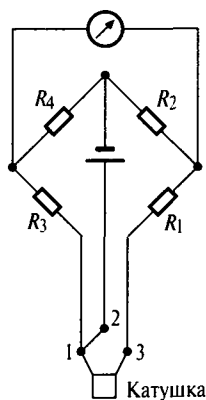


Рис. 9.3. Трехпроводная схема для термометра сопротивления

ния. Любое изменение сопротивлений выводов будет действовать на все три провода одинаково, так что в двух плечах моста будут одновременно происходить аналогичные изменения сопротивлений, которые и будут компенсироваться, если резисторы R_1 и R_3 имеют одинаковые значения сопротивлений. **Рис. 9.4** показывает пример четырехпроводной схемы компенсации. Она включает дублирующую установку компенсационных проводов, подключенных к другому плечу моста. При таком включении любые температурные изменения сопротивления выводов будут взаимно компенсироваться.

При использовании датчиков деформации (тензодатчиков) также бывает необходимо компенсировать температурные воздействия, оказывающие влияние на величину их электрического сопротивления (см. пункт 3 главы 8), так как в этом случае сопротивление датчика зависит и от изменения деформации, и от изменения температуры. Влияние температурного воздействия может быть устранено при использовании недеформируемого датчика с сопротивлением, равным сопротивлению измерительного тензодатчика. На такой датчик оказывает влияние только температура, но не деформация. Таким образом, любые изменения температуры приведут к одинаковому изменению сопротив-

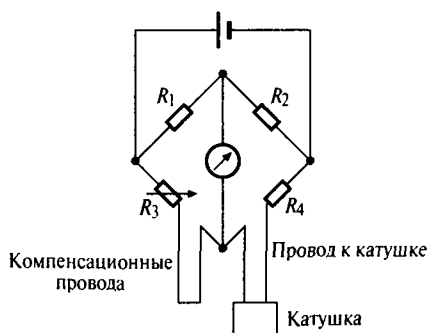


Рис. 9.4. Четырехпроводная схема для термометра сопротивления

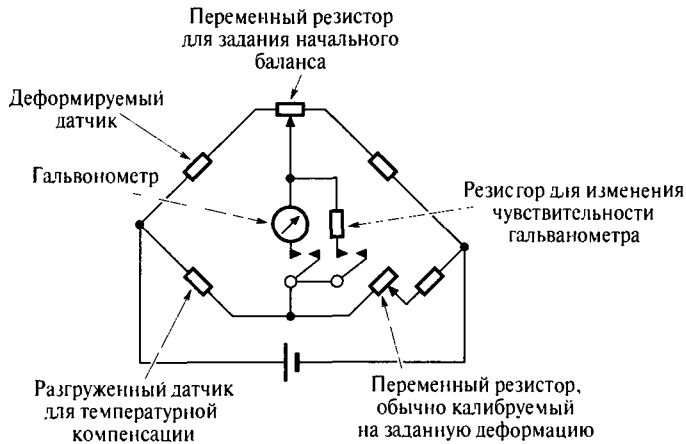


Рис. 9.5. Схема компенсации при использовании датчиков деформации

ления как измерительного, так и разгруженного датчика. Так как измерительный датчик включен в одно плечо моста Уитстона, а разгруженный датчик — в соседнее, то в такой схеме происходит компенсация температурных воздействий (**Рис. 9.5**).

Альтернативой использования разгруженного датчика с целью компенсации температурных воздействий является применение элемента, одновременно реагирующего и на сжатие, и на растяжение, например применение динамометрического элемента (см. пункт 21 главы 8). При этом в одно плечо моста подключается датчик сжатия, а в соседнее плечо — датчик растяжения (**Рис. 8.23**). Здесь происходит взаимная компенсация температурных воздействий, приводящих к изменению сопротивлений. При таком включении датчиков деформация приводит к уменьшению сопротивления в одном плече моста при одновременном увеличении сопротивления в другом плече, при этом разность потенциалов разбаланса моста становится значительно большей по сравнению с вариантом подключения только одного датчика, что также повышает точность измерений.

Мосты переменного тока

4. Сбалансированный мост

На **Рис. 9.6** показана принципиальная схема моста переменного тока. Условие для получения нулевой разности потенциалов между точками В и D, т.е. условие баланса моста, состоит в полной идентичности разности потенциалов на сопротивлениях Z_1 и Z_3 как по амплитуде, так и по фазе, а также аналогичной идентичности разности потенциалов на сопротивлениях Z_2 и Z_4 по амплитуде и по фазе, т.е.:

$$I_1 Z_1 = I_2 Z_3,$$

$$I_1 Z_2 = I_2 Z_4.$$

Следовательно:

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4}.$$

Это основное условие баланса для любого моста переменного тока, и оно должно выполняться и для действительной, и для мнимой частей сопротивления для того, чтобы иметь сбалансированный мост как по амплитуде, так и по фазе.

Схема **моста Максвелла—Вина** представлена на **Рис. 9.7**. Для этой схемы справедливо следующее:

$$\frac{1}{Z_1} = \frac{1}{R_1} + j\omega C_1,$$

$$Z_1 = \frac{R_1}{1 + j\omega C_1 R_1},$$

$$Z_2 = R_2,$$

$$Z_3 = R_3,$$

$$Z_4 = R_4 + j\omega L_4.$$

Следовательно, используя уравнение баланса, получаем:

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4},$$

$$Z_4 = \frac{Z_2 Z_3}{Z_1},$$

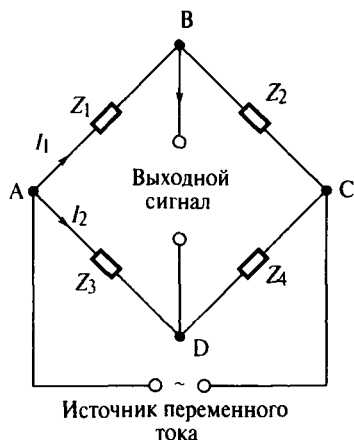


Рис. 9.6. Принципиальная схема моста переменного тока

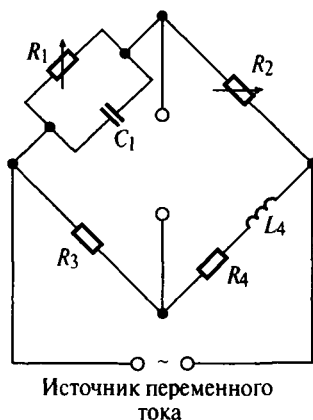


Рис. 9.7. Схема моста Максвелла—Вина

$$R_4 + j\omega L_4 = \frac{R_2 R_3 (1 + j\omega C_1 R_1)}{R_1}.$$

Условие баланса для действительных частей можно записать в виде:

$$R_4 = \frac{R_2 R_3}{R_1}.$$

А для мнимых частей его можно выразить так:

$$L_4 = R_2 R_3 C_1.$$

Таким образом, могут быть определены значения сопротивления R_4 и индуктивности L_4 . Процедура обычно начинается с настройки величины сопротивления R_2 для получения наилучшего баланса, а затем значения R_1 , чтобы улучшить эту настройку. Затем вновь подстраивается R_2 , и так до получения окончательного баланса. Мост используется с низкодобротными катушками.

На **Рис. 9.8** показаны три других вида индуктивных мостов. Для **моста Оуэна** условиями баланса являются следующие выражения:

$$L_4 = R_2 R_3 C_1,$$

$$R_4 = \frac{R_2 C_1}{C_3}.$$

Для **моста Максвелла** условия баланса записываются в виде:

$$L_1 = \frac{R_2 L_3}{R_4},$$

$$R_1 = \frac{R_2 R_3}{R_4}.$$

Для **моста Хэя** этими условиями являются:

$$L_1 = \frac{R_2 R_3 C_4}{1 + \omega^2 C_4^2 R_4^2},$$

$$R_1 = \frac{R_2 R_3 \omega^2 C_4^2 R_4^2}{1 + \omega^2 C_4^2 R_4^2},$$

$$Q_1 = \frac{1}{\omega C_4 R_4}.$$

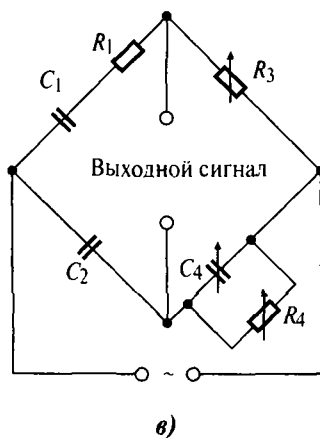
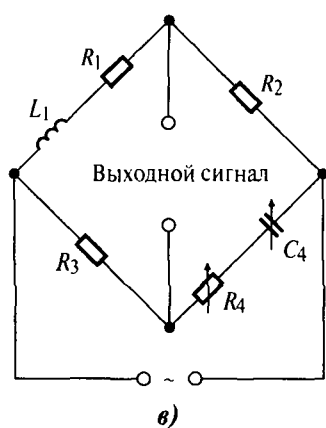
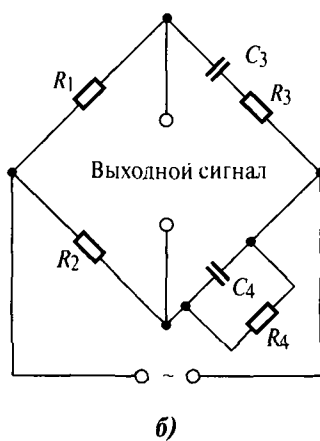
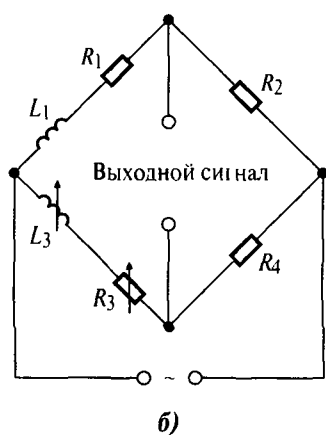
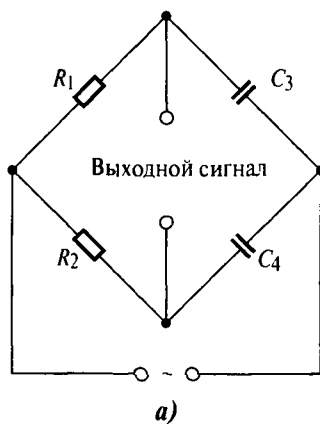
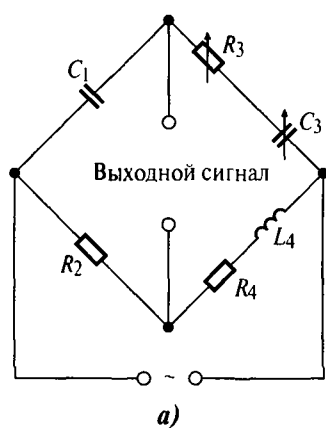


Рис. 9.8. а — мост Оуэна;
б — мост Максвелла;
в — мост Хэя

Рис. 9.9. а — мост Сьюти,
б — мост Вина;
в — мост Шеринга

На **Рис. 9.9** показаны три вида емкостных мостов. Для *моста Де Сьюти* условие баланса можно выразить как:

$$R_1 C_3 = R_2 C_4.$$

Для *моста Вина*:

$$C_4 = \frac{(R_1 / R_2) C_3}{1 + \omega^2 R_3^2 C_3^2},$$

$$R_4 = \frac{R_2 (1 + \omega^2 R_3^2 C_3^2)}{\omega^2 R_3 R_1 C_3},$$

а для *моста Шеринга*:

$$R_1 = \frac{C_4 R_3}{C_2},$$

$$C_1 = \frac{C_2 R_4}{R_3},$$

$$\text{Тангенс угла потерь} = \operatorname{tg} \delta = \omega C_4 R_4.$$

5. Выходная разность потенциалов

Общий вид моста переменного тока включает в себя два резистора (**Рис. 9.6**) с сопротивлениями Z_3 и Z_4 и два реактивных импеданса, т.е. пару индуктивных или пару емкостных элементов. При отсутствии нагрузки, т.е. при бесконечно большом импедансе нагрузки, выходная разность потенциалов V_0 между точками В и D равна:

$$V_{AD} = E_s \left(\frac{R_3}{R_3 + R_4} \right),$$

$$V_{AB} = E_s \left(\frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \right),$$

$$V_0 = V_{AB} - V_{AD} = E_s \left(\frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right).$$

Для индуктивных элементов справедливо: $Z_1 = j\omega L_1$ и $Z_2 = j\omega L_2$, следовательно:

$$V_0 = E_s \left(\frac{j\omega L_1}{j\omega L_1 + j\omega L_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right),$$

$$V_0 = E_s \left(\frac{L_1}{L_1 + L_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right).$$

Для конденсаторов можно записать:

$$Z_1 = 1/j\omega C_1 \text{ и } Z_2 = 1/j\omega C_2,$$

тогда:

$$V_0 = E_s \left[\frac{(1/j\omega C_1)}{(1/j\omega C_1) + (1/j\omega C_2)} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right],$$

$$V_0 = E_s \left[\frac{1}{1 + (C_1/C_2)} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right].$$

6. Дифференциальные датчики

Одним из вариантов применения мостов переменного тока, описанных выше, является их использование для дифференциальных датчиков. В состав таких датчиков, как правило, входят пара конденсаторов или катушек и перемещающаяся пластина. Перемещение этой пластины увеличивает значение одной из емкостей или индуктивностей, а значение другой — соответственно уменьшает. На **Рис. 9.10** показан емкостный дифференциальный датчик. Перемещение центральной пластины на расстояние x приводит к увеличению емкости одного конденсатора до значения $\epsilon_r \epsilon_0 A / (d - x)$ и соответственному уменьшению емкости другого до $\epsilon_r \epsilon_0 A / (d + x)$. Если эти два конденсатора включены в соседние плечи моста и значения сопротивлений R_3 и R_4 равны, то справедливо следующее:

$$V_0 = E_s \left[\frac{1}{1 + (d + x)/(d - x)} - \frac{1}{2} \right] = \frac{E_s x}{2d}.$$

Выходное напряжение моста, таким образом, пропорционально перемещению пластины x .

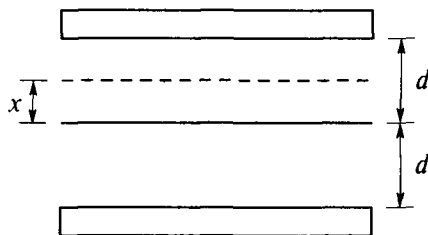


Рис. 9.10. Емкостный дифференциальный датчик

На **Рис. 9.11** показан индуктивный дифференциальный датчик. Перемещение центральной пластины на расстояние x приводит к увеличению индуктивности в одной катушке и ее уменьшению в

другой. Как показано в пункте 9 главы 8, величина одной из индуктивностей при этом станет равна $L_0/[1 + k(d - x)]$, а величина другой $L_0/[1 + k(d + x)]$, следовательно, при включении этих двух катушек в соседние плечи моста и при равенстве значений сопротивлений R_3 и R_4 можно записать:

$$V_0 = E_s \left[\frac{1/\{1 + k(d - x)\}}{[1/\{1 + k(d - x)\} + 1/\{1 + k(d + x)\}] - \frac{1}{2}} \right],$$

$$V_0 = \frac{E_s kx}{2(1 + kd)}.$$

Выходной сигнал и в этом случае пропорционален перемещению x .

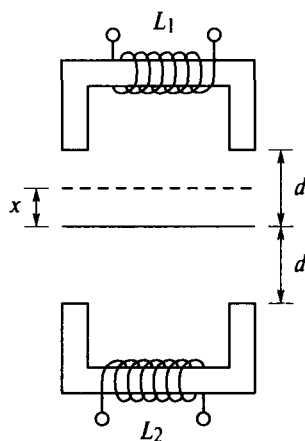


Рис. 9.11. Индуктивный дифференциальный датчик

Потенциометрические мосты

7. Потенциометрическая измерительная схема

Потенциометрическая измерительная схема (Рис. 9.12) включает в себя потенциометр для создания переменной разности потенциалов, которая используется для компенсации, т.е. балансировки измеряемой разности потенциалов. Полная разность потенциалов создается всей длиной потенциометра, любая произвольная часть этой разности может быть получена перемещением скользящего контакта вдоль трека. Эта разность потенциалов регулируется до тех пор, пока она не скомпенсирует измеряемую разность потенциалов или э.д.с. E . Условие достижения баланса определяется гальванометром по исчезновению тока. Если скользящий контакт устанавливается на расстоянии L или при угловом смещении θ от конца трека с нуле-

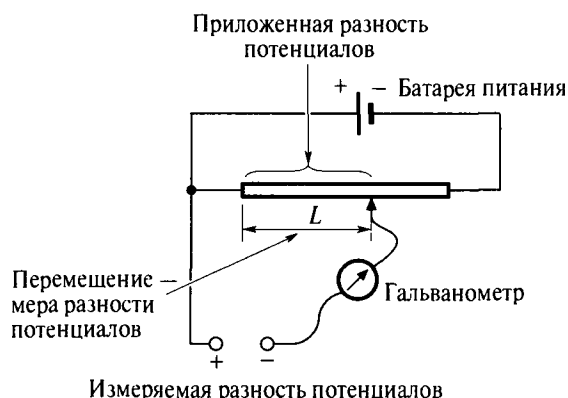


Рис. 9.12. Потенциометрическая измерительная схема

вой разностью потенциалов, то при условии однородности сопротивления трека на единицу длины или угла измеренная э.д.с. определяется как:

$$E = kL \text{ или } k\theta,$$

где k — постоянная величина, фактически определяющая разность потенциалов на единицу длины или угла трека. Она может быть определена при повторении операции балансировки со стандартным элементом э.д.с. E_s . В этом случае справедливо:

$$E_s = kL_s \text{ или } k\theta_s,$$

где L_s — расстояние или θ_s — угол смещения скользящего контакта от начала трека при условиях баланса со стандартным элементом э.д.с.. Следовательно:

$$E = \frac{E_s L}{L_s} \text{ или } \frac{E_s \theta}{\theta_s}.$$

Для коммерческих видов потенциометров скользящий контакт перемещается вдоль шкалы, градуированной в вольтах. Стандартизация достигается установкой указателя на заданную величину э.д.с. эталонного элемента и затем настройкой напряжения на конкретном потенциометре при помощи регулировки сопротивления, включенного последовательно с источником питания моста, до получения баланса. Гальванометр используется с единственной целью — определение момента исчезновения тока. Так как при условии достижения баланса в цепи будет отсутствовать ток, то при этом не будет происходить и потребление мощности источника, э.д.с. которого измеряется. Следовательно, этот метод полезен при использовании датчиков с низкой выходной мощностью. Такая система является вольтметром с бесконечным импедансом.

8. Термопарный потенциометрический мост

На Рис. 9.13 показана разновидность потенциометрического моста, который может быть использован с термопарой. Э.д.с. от термопары составляет всего милливольты. Последовательно с потенциометром включается резистор для того, чтобы обеспечить соответствующую небольшую разность потенциалов на единицу длины или угла трека. Полезно выполнить трек потенциометра как можно длиннее. Э.д.с. термопары балансируется только на длине трека, в то время как стандартный элемент, который имеет намного большую собственную э.д.с., балансируется на длине трека плюс добавочное сопротивление.

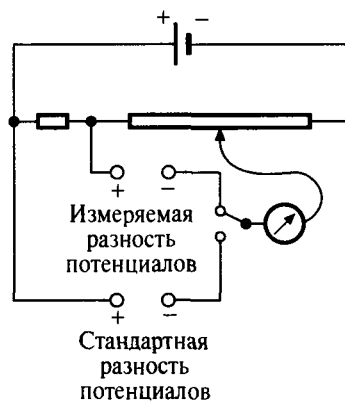


Рис. 9.13. Термопарный потенциометрический мост

9. Самобалансирующийся потенциометр

На Рис. 9.14 показана принципиальная схема самобалансирующегося потенциометрического моста. Разность измеряемого напряжения и падения потенциала на сегменте потенциометрического трека подается через усилитель на электродвигатель. Ось двигателя начинает вращаться, при этом перемещая подвижный контакт потенциометра по треку до тех пор, пока разность потенциалов между этими двумя сигналами не сократится до нуля. Положение подвижного контакта потенциометра в этом случае фиксирует измеряемую разность потенциалов.

Усилители

10. Рычаги

Рычаги применяются для изменения величины сигнала перемещения (Рис. 9.15). Передаточная функция рычага зависит от относительных расстояний точки вращения рычага до точек приложения к нему входного сигнала и снятия выходного сигнала. Из подобия треугольников следует:

$$\frac{\text{Входное перемещение}}{\text{Расстояние от входа до точки вращения}} = \frac{\text{Выходное перемещение}}{\text{Расстояние от выхода до точки вращения}}.$$

Следовательно,

$$\text{Передаточная функция} = \frac{\text{Выход}}{\text{Вход}} = \frac{\text{Расстояние от выхода до точки вращения}}{\text{Расстояние от входа до точки вращения}}.$$

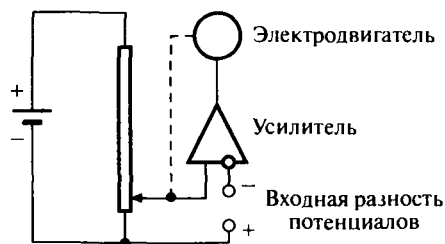
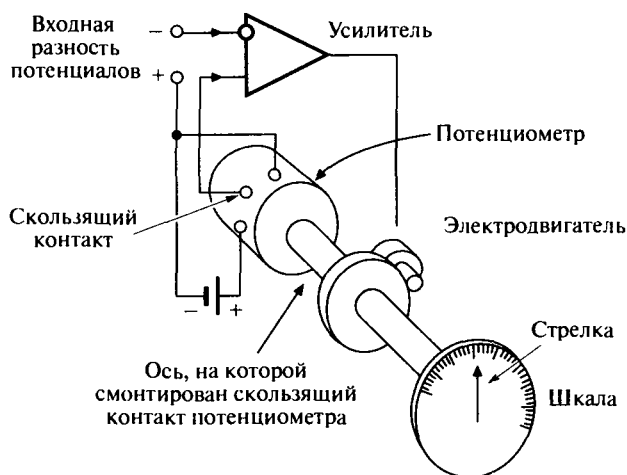


Рис. 9.14. Самобалансирующий потенциометр

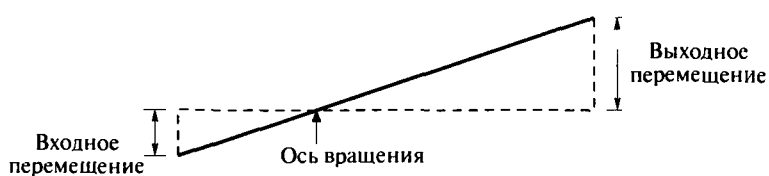


Рис. 9.15. Рычаг

Еще большие усиления могут быть получены при помощи комбинации рычагов. С такими комбинированными рычагами выход от первого уровня становится входом для второго уровня. Передаточная функция комбинированного рычага является произведением передаточных функций двух рычагов.

11. Шестереночная передача

Шестереночная передача может быть использована для превращения углового перемещения одной оси в угловое перемещение другой оси. Для системы из двух шестерней (**Рис. 9.16**) с N_1 зубьями на входной шестерне и N_0 — на выходной вращение входной оси на один оборот приведет к вращению выходной оси на величину (N_1/N_0) оборота. Таким образом, передаточная функция здесь равна:

$$\text{Передаточная функция} = \frac{N_1}{N_0}.$$

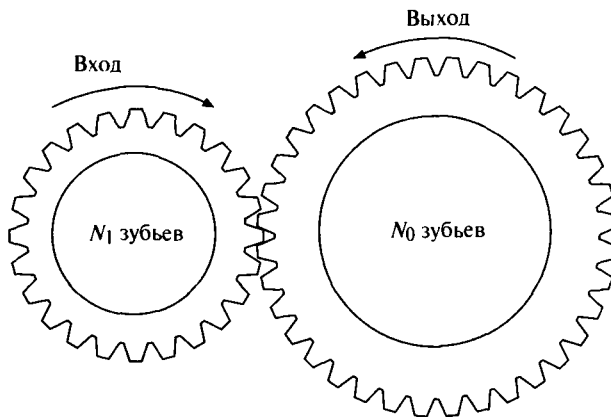


Рис. 9.16. Простая шестереночная передача

Для получения еще большего усиления может быть использована комбинированная шестереночная передача. Для шестереночной передачи, показанной на **Рис. 9.17**, шестеренки В и С соединены одной осью, и передаточная функция здесь определяется как:

$$\text{Передаточная функция} = \frac{N_A}{N_B} \times \frac{N_C}{N_D}.$$

12. Оптическое усиление

Если плоское зеркало поворачивается на угол θ , то падающий луч света будет отражаться от него с поворотом 2θ (**Рис. 9.18**), и, таким образом, угловое перемещение зеркала будет усилено. На **Рис. 9.19** показан вариант системы, использующей несколько мо-

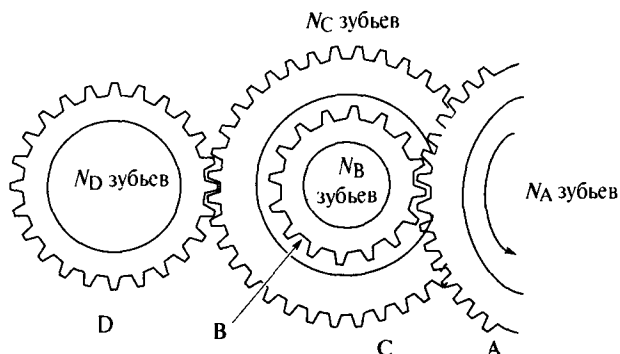


Рис. 9.17. Комбинированная шестереночная передача

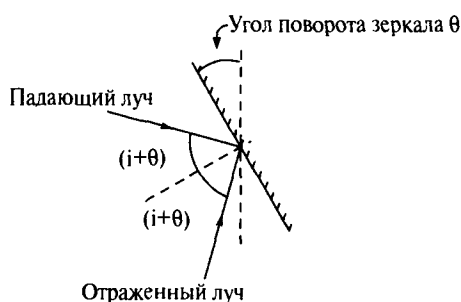


Рис. 9.18. Вращение плоского зеркала

дифицированный указанный принцип. Источник света помещается в точке фокуса выпуклой линзы, что создает параллельный пучок световых лучей, выходящих из линзы. Такой пучок света называется **коллимированным**. Если такой пучок света падает на плоское зеркало строго под прямым углом к его поверхности, то отраженные лучи вернутся вдоль того же пути, по которому шли падающие лучи, и соберутся в виде изображения в той же точке, что и источник света. Однако если зеркало повернуто на угол θ , изображение сфокусируется в другом месте от исходного источника света. Перемещение y задается выражением:

$$\frac{y}{f} = \operatorname{tg} 2\theta,$$

где f — фокусное расстояние линзы. Для малых величин θ используется аппроксимационное выражение:

$$\frac{y}{f} = 2\theta.$$

На таком преобразовании углового перемещения в линейное основано большое количество приборов, используемых для измерения углового перемещения (см. главу 11).

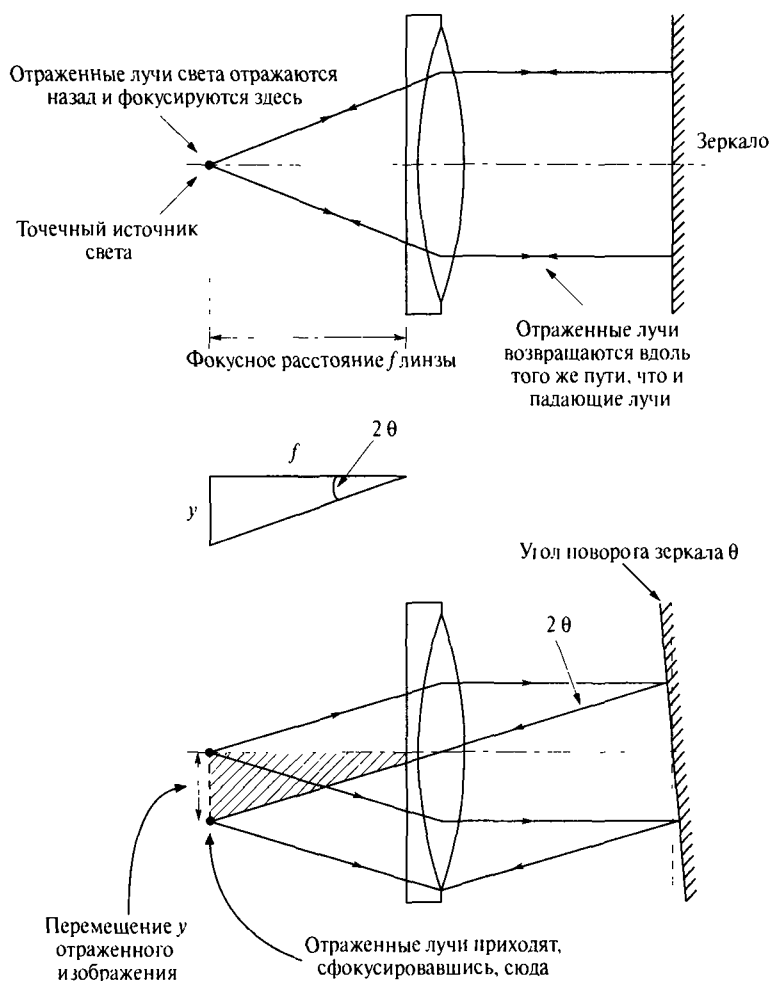


Рис. 9.19. Вращение плоского зеркала с коллимирующими линзами

13. Операционный усилитель

На Рис. 9.20 показано включение операционного усилителя по схеме инвертирующего усилителя. Операционный усилитель имеет очень высокую величину передаточной функции — более 100 000, а изменение его выходного напряжения обычно ограничено ± 10 В. Входное напряжение V_x , приложенное к усилителю в точке X, должно, следовательно, изменяться в пределах ± 0.0001 В. Это, в сущности, нуль, и такая точка X фактически имеет потенциал земли. Разность потенциалов на резисторе R_1 равна $(V_1 - V_x)$. Так как V_x близко к нулю, входной потенциал V_1 может рассматриваться полностью приложенным к R_1 . Таким образом, если I_1 — это ток, протекающий через резистор R_1 , то:

$$V_1 = I_1 R_1.$$

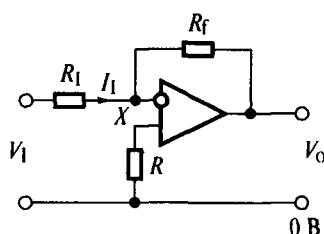


Рис. 9.20. Инвертирующий усилитель

Так как операционный усилитель имеет очень высокий импеданс, фактически отсутствует ток в него через точку X. Следовательно, ток I_1 течет только через резистор R_f . Разность потенциалов на резисторе R_f равна $(V_x - V_0)$, и поэтому фактически она равна $-V_0$. Следовательно:

$$-V_0 = I_1 R_f.$$

$$\text{Передающая функция} = \frac{V_0}{V_1} = -\frac{R_f}{R_1}.$$

Отрицательный знак указывает, что выходной сигнал перевернут на 180° по фазе по отношению к входному сигналу.

На **Рис. 9.21** показан операционный усилитель, включенный как неинвертирующий усилитель. Для такого включения:

$$\text{Передающая функция} = 1 + \frac{R_f}{R_1}.$$

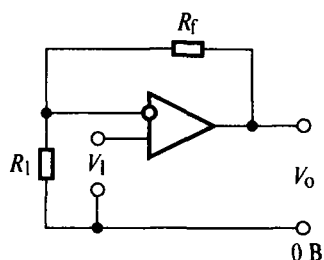


Рис. 9.21. Неинвертирующий усилитель

На **Рис. 9.22** показан операционный усилитель, включенный по схеме дифференциального усилителя. В этом случае:

$$V_0 = \frac{R_f}{R_1} (V_2 - V_1).$$

Такой усилитель часто используется в мостовых цепях для усиления разности потенциалов выходного разбаланса напряжений.

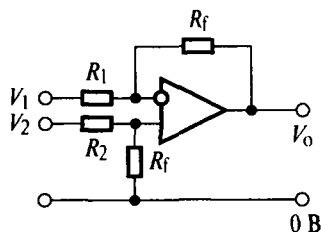


Рис. 9.22. Дифференциальный усилитель

На Рис. 9.23 показан операционный усилитель, включенный как интегрирующий усилитель. Для такого включения разность потенциалов на конденсаторе обратной связи равна $(V_- - V_o)$, и, таким образом, заряд на нем равен $C_f(V_- - V_o)$. Но V_- — это фактически потенциал земли. Следовательно, заряд равен $-C_f V_o$. Это входной заряд Q , следовательно:

$$V_o = -\frac{Q}{C_f}.$$

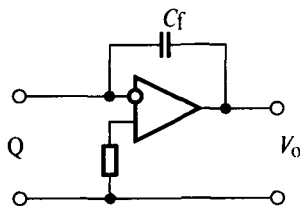


Рис. 9.23. Интегрирующий усилитель

В идеальном операционном усилителе выходной сигнал должен быть равен нулю при обоих заземленных входах. Практически такого не бывает никогда. Операционный усилитель ведет себя так, как если бы небольшая разность потенциалов существовала между его входами. Величина этой разности называется **дифференциальным входным напряжением смещения**. На величину этого напряжения смещения очень сильно влияет температура. Хотя при некоторой температуре оно может быть скомпенсировано, но при любом изменении температуры величина этого напряжения смещения тоже изменится, что вызовет дрейф нуля на выходе усилителя.

Для идеального операционного усилителя выходной сигнал должен зависеть только от разности напряжений сигналов, приложенных к его входам, т.е. от $(V_+ - V_-)$ и не зависеть от самой величины сигналов на входах. Но на практике выходной сигнал подвержен воздействию синфазного напряжения $V_{см}$ на входах усилителя, которое обычно равно величине среднего напряжения входных сигналов. **Коэффициент ослабления синфазного сигнала (КОСС)** определяется как:

$KOCC =$

$$= \frac{\text{дифференциальная передаточная функция } A_d \text{ при } V_{cm} = 0}{\text{передаточная функция синфазного сигнала } A_{cm} \text{ при } V_+ = V_-}.$$

Выходной сигнал операционного усилителя в этом случае равен:

$$V_0 = A_d(V_+ - V_-) + A_{cm}V_{cm},$$

$$V_0 = A_0 \left[(V_+ - V_-) + \frac{V_{cm}}{KOCC} \right].$$

Для дифференциального усилителя, показанного на **Рис. 9.22**, подразумевается, что выходной сигнал равен:

$$V_0 = \frac{R_f}{R_1}(V_2 - V_1) + \left(1 + \frac{R_f}{R_1} \right) \frac{V_{cm}}{KOCC}.$$

Для более высоких значений КОСС слагаемое синфазного сигнала становится меньше, и все больше это выражение приближается к виду для идеального операционного усилителя. Величина КОСС обычно выражается в децибелах:

$$KOCC = 20 \lg(A_d/A_{cm}).$$

Типичной величиной для КОСС является 90 Дб.

Дополнительная литература: Moore D., Donaghy J., *Operational amplifier circuits* (Heinemann 1986).

Линеаризация сигналов

14. Операционный усилитель с цепью линеаризации

Цепь обратной связи операционного усилителя, которая была предназначена для получения нелинейной связи между входным и выходным сигналами, можно также использовать для преобразования нелинейного входного сигнала в линейный выходной. Это достигается соответствующим подбором компонентов для цепи обратной связи. Например, можно использовать диод, как показано на **Рис. 9.24**. Диод имеет нелинейную характерис-

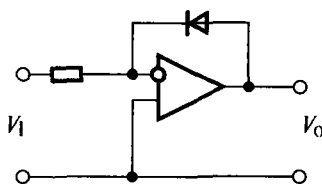


Рис. 9.24. Цепь линеаризации для операционного усилителя

тику и дает логарифмическое соотношение между входным напряжением V_1 и выходным напряжением V_0 вида:

$$V_0 = C \ln(V_1),$$

где C — постоянная величина. Если входной сигнал V_1 от датчика связан с сигналом θ на входе датчика соотношением:

$$V_1 = K e^{\alpha \theta},$$

где K и α — постоянные величины, то:

$$V_0 = C \ln(K e^{\alpha \theta}) = C \ln(K) + C \alpha \theta.$$

Таким образом, выходной сигнал будет прямо пропорционален сигналу на входе датчика.

Масштабирование тока и напряжения

15. Шунты

Термин «шунт» обычно применяется для обозначения резистора, включенного параллельно с прибором для изменения диапазона измерения тока на этом приборе (**Рис. 9.25**). Разность потенциалов на приборе равна $I_i R_i$, а на шунте — $(I - I_i) R_s$. Так как они должны быть равны:

$$(I - I_i) R_s = I_i R_i,$$

то:

$$R_s = \frac{I_i R_i}{I - I_i}.$$

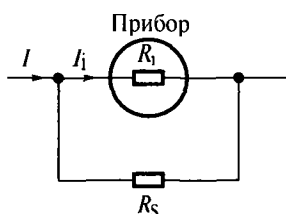


Рис. 9.25. Шунтирование прибора

16. Добавочные сопротивления

Термин «добавочное сопротивление» используется для описания резистора, соединенного последовательно с прибором, для изменения рабочего диапазона измерения напряжений для этого прибора (**Рис. 9.26**). Разность потенциалов V является суммой разностей потенциалов на добавочном сопротивлении и на приборе. Следовательно:

$$V = I_i (R_m + R_i).$$

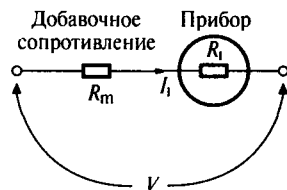


Рис. 9.26. Добавочное сопротивление к прибору

17. Выпрямители

На **Рис. 9.27** показано, как базовую схему измерительного прибора постоянного тока можно использовать для измерений на переменном токе. Выпрямителями обычно являются германиевые или кремниевые диоды. Для показанного на рисунке мостового включения диодов через измерительный прибор проходит пульсирующий однонаправленный ток. Инерция катушки измерителя позволяет ему показывать среднюю величину этих пульсаций. Однако измерители обычно градуируются в величинах среднеквадратических значений в предположении, что сигнал на входе моста синусоидальный. Среднеквадратическая величина в 1.1 раза больше средней величины.

18. Делители напряжения

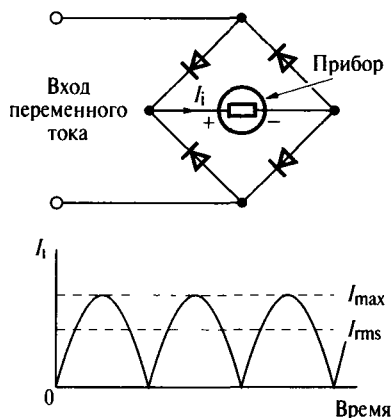


Рис. 9.27. Прибор с двухполупериодным выпрямителем

На **Рис. 9.28** показаны различные виды делителей напряжения. Для цепочки резисторов (**Рис. 9.28а**) выходная разность потенциалов V_0 задается выражением:

$$\frac{V_0}{V_1} = \frac{R_1}{R_1 + R_2}.$$

Такой делитель может быть использован для постоянного тока и переменного тока низкой частоты. Влияние сопротивления нагрузки на выходной сигнал рассмотрено в главе 5.

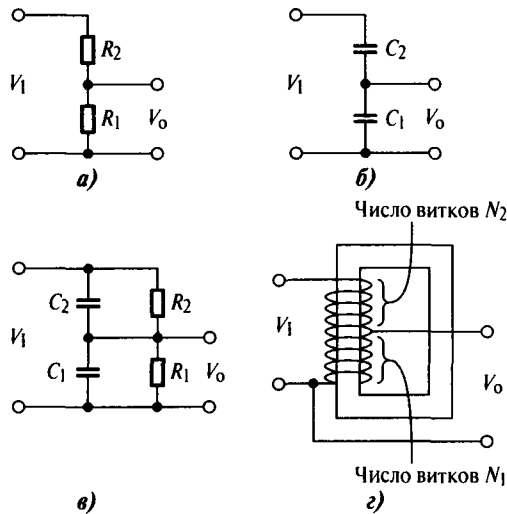


Рис. 9.28. Делители напряжения

Емкостный делитель (Рис. 9.28б) может быть использован в цепях переменного тока для частот в диапазоне 50 Гц... МГц. Для цепи с двумя последовательными конденсаторами справедливо:

$$Q = \left(\frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \right) V_1,$$

откуда, так как $Q = C_2 V_0$, следует:

$$\frac{V_0}{V_1} = \frac{C_1}{C_1 + C_2}.$$

Делитель, который может использоваться и для низкочастотного диапазона как резистивный делитель, и для высокочастотного диапазона как емкостный делитель, представлен на Рис. 9.28в в виде резистивно-емкостного делителя. Для такой схемы:

$$\frac{V_0}{V_1} = \frac{(R_1 / j\omega C_1) / (R_1 + 1 / j\omega C_1)}{\left(\frac{R_1 / j\omega C_1}{R_1 + \{1 / j\omega C_1\}} \right) + \left(\frac{R_2 / j\omega C_2}{R_2 + \{1 / j\omega C_2\}} \right)}.$$

Если постоянная времени настроена так, чтобы быть одинаковой для каждой резистивно-емкостной пары, т.е. $R_1 C_1 = R_2 C_2$, то:

$$\frac{V_0}{V_1} = \frac{R_1}{R_1 + R_2}.$$

Автотрансформатор является индуктивным делителем (Рис. 9.28, г), для которого справедливо соотношение:

$$\frac{V_0}{V_1} = \frac{N_1}{N_1 + N_2}.$$

19. Трансформаторы

Использование **трансформатора напряжения** — это основной способ понижения или повышения переменного напряжения в требуемом отношении. Трансформатор состоит из прямоугольного сердечника, на который наматываются концентрические обмотки. Витки обмоток наматываются аккуратно для уменьшения потерь в сердечнике. Вторичный ток обычно мал, и поэтому справедливо:

$$\frac{V_s}{V_p} = \frac{N_s}{N_p},$$

где V_s — напряжение на вторичной обмотке, V_p — напряжение на первичной обмотке, N_s — число витков во вторичной обмотке, N_p — число витков в первичной обмотке. Одним из основных преимуществ использования трансформаторов для понижения или повышения напряжения является тот факт, что в них первичная и вторичная обмотки электрически изолированы друг от друга. Преобразование высоких напряжений более безопасно выполнять при помощи трансформаторов, чем при помощи добавочных сопротивлений.

В случае масштабирования переменного тока с применением шунтов возникает следующая проблема: величина тока, протекающего через измерительный прибор, будет зависеть от внутреннего сопротивления этого прибора, которое изменяется вместе с частотой. Очевидно, что при больших токах сопротивление шунта должно быть очень низким, чтобы не возникали проблемы с подсоединением такого шунта к измерительному прибору, так как сопротивление шунта и всех соединений становится слишком значимым, что может привести к сильным погрешностям. Эта проблема может быть успешно решена при помощи **трансформатора тока**.

Трансформаторы тока имеют либо несколько витков, либо даже просто один виток на первичной обмотке. Этот виток иногда называется **первичным стержнем** (Рис. 9.29). Этот стержень подсоединяется последовательно с нагрузкой, где и должен быть измерен ток. Вторичная обмотка имеет много витков, и к ней подсоединяется измерительный прибор. Вторичная цепь получается почти короткозамкнутой, поэтому необходимо всегда помнить, что во избежание повреждения из-за высокого напряжения трансформатор тока никогда не должен работать с разомкнутой вторичной обмоткой. Для такого трансформатора тока с определенной степенью точности можно записать, что

$$\frac{I_s}{I_p} = \frac{N_p}{N_s},$$

где I_s — ток во вторичной обмотке, I_p — ток в первичной обмотке.

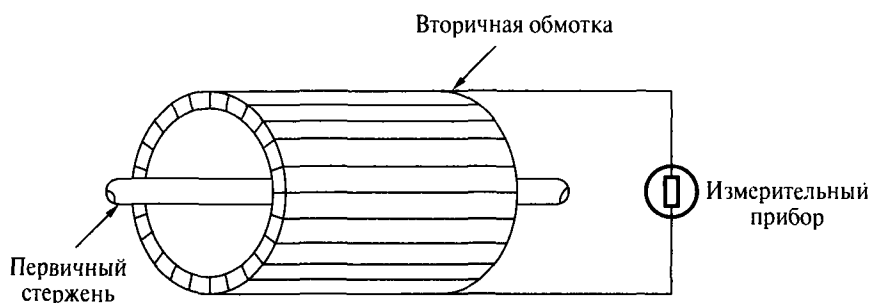


Рис. 9.29. Трансформатор тока

Ослабление

Аттенюатор (ослабитель) уменьшает входную мощность таким образом, что отношение входной мощности к выходной остается постоянным. Аттенюаторы используются в случаях, когда измеряемый сигнал слишком велик для непосредственного измерения. **Ослабление** A -сигнала в децибелах определяется как:

$$A = 10 \lg(P_1/P_0),$$

где P_1 — это входная мощность, а P_0 — выходная мощность.

Для двух последовательно включенных аттенюаторов выходная мощность первого аттенюатора P_{01} становится входной для второго. Таким образом, для первого аттенюатора будет справедливо:

$$A_1 = 10 \lg(P_1/P_{01}),$$

а для второго аттенюатора:

$$A_2 = 10 \lg(P_{01}/P_0),$$

$$\begin{aligned} A_1 + A_2 &= 10 \lg(P_1/P_{01}) + 10 \lg(P_{01}/P_0) = 10 \lg \left(\frac{P_1}{P_{01}} \right) \left(\frac{P_{01}}{P_0} \right) = \\ &= 10 \lg(P_1/P_0). \end{aligned}$$

Это и есть ослабление для всей системы, т.е. $A = A_1 + A_2$.

20. Аттенюаторы

Чаще всего аттенюаторы выполняются в виде повторяющихся секций. На Рис. 9.30 показан аттенюатор, состоящий из одной **Т-образной секции (Т-секции)** в цепи, где V_1 — это разность потенциалов на входе, а V_0 — разность потенциалов на выходе. В симметричных Т-секциях входные и выходные сопротивления равны, т.е. $R_s = R_L$, $R_1 = R_2$. Если это так, то справедливо следующее:

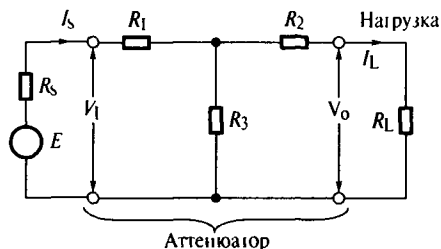


Рис. 9.30. Т-образная секция аттенюатора

$$A = 10 \lg \left(\frac{V_1^2 / R_S}{V_0^2 / R_L} \right) = 20 \lg \left(\frac{V_1^2}{V_0^2} \right).$$

Обозначив $N = (V_1^2 / V_0^2)$, получим $A = 20 \lg N$. В случае симметричной Т-секции получим:

$$R_1 = R_2 = R_L \left(\frac{N-1}{N+1} \right),$$

$$R_3 = R_L \left(\frac{2N}{N^2-1} \right).$$

Если аттенюатор применяется просто для согласования сопротивлений, то его проектируют так, чтобы у него был минимальный импеданс, а $R_2 = 0$. Тогда Т-секция превращается в **Л-образную секцию (Л-секцию)**.

На **Рис. 9.31** показан аттенюатор, построенный в виде **Π-образной секции (Π-секции)**. В случае симметричности, если входное и выходное сопротивления равны и $R_1 = R_3$, $A = 20 \lg N$, тогда:

$$R_1 = R_3 = R_L \left(\frac{N+1}{N-1} \right),$$

$$R_2 = R_L \left(\frac{N^2-1}{2N} \right).$$

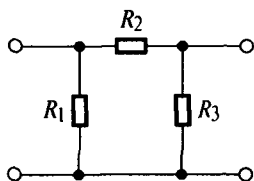


Рис. 9.31. Π-образная секция аттенюатора

Фильтрация

Фильтрация — это процесс удаления определенной полосы частот из частотного диапазона сигнала, оставшиеся частоты должны передаваться без искажений. Фильтр — это электрическая схема, частотный диапазон которой зависит от передаточной характеристики. Фильтр называется *пассивным*, если в его состав входят только резисторы, конденсаторы и катушки индуктивнос-

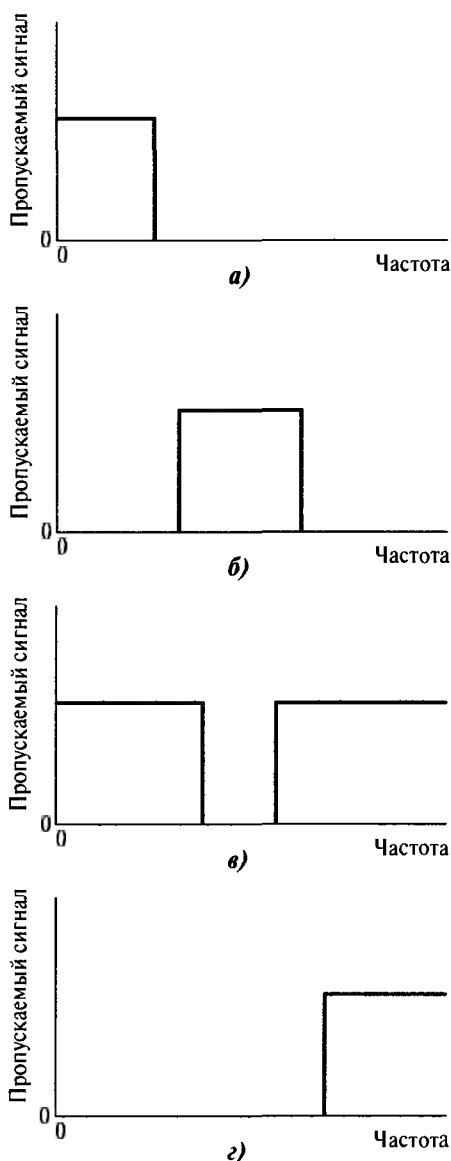


Рис. 9.32. Идеальные характеристики фильтра:

- а — фильтр нижних частот;
- б — полосовой фильтр;
- в — режекторный фильтр;
- г — фильтр верхних частот

ти. Фильтр называется **активным**, если в его состав входит также усилительный элемент, например, операционный усилитель. У пассивных фильтров есть следующий недостаток: ток, протекающий через нагрузку, может изменять частотную характеристику фильтра, этого не происходит в случае активного фильтра.

Диапазон частот, пропускаемый фильтром, называется **полосой пропускания**. Диапазон частот, ослабляемый фильтром, называется **полосой заграждения**. Граница между полосой пропускания и полосой заграждения называется **частотой среза**. Фильтры классифицируются по диапазону частот, который они пропускают или подавляют (**Рис. 9.32**): **фильтр нижних частот** имеет полосу пропускания на нижних частотах, **фильтр верхних частот** имеет полосу пропускания на высоких частотах, **полосовой пропускающий фильтр**, или **полосовой фильтр**, пропускает только определенную полосу частот, **режсекторный фильтр** подавляет только определенную полосу частот.

21. Пассивные фильтры

Наиболее часто применяются фильтры, состоящие из **T-образных** и **Π-образных секций**. Фильтры обычно строятся из нескольких секций, входное сопротивление каждой секции равно сопротивлению нагрузки для этой секции. На **Рис. 9.33** показаны

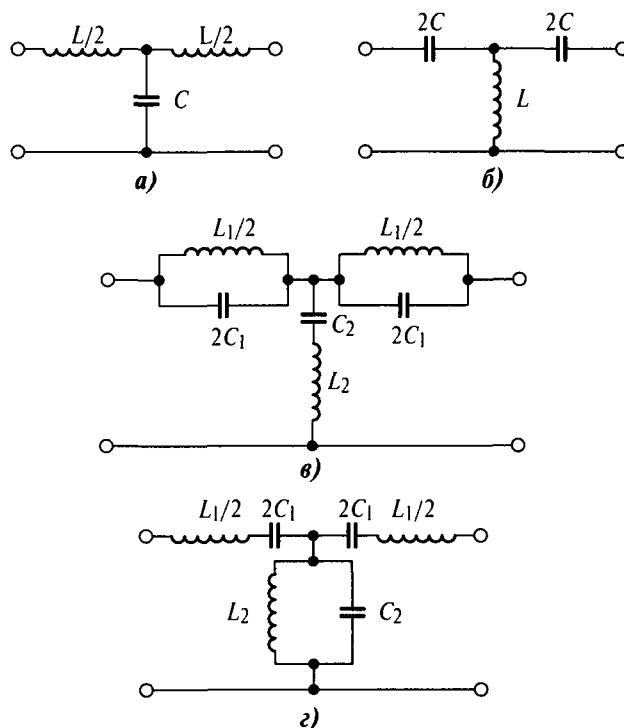


Рис. 9.33. T-образные секции фильтра: а — фильтр нижних частот; б — фильтр верхних частот; в — режсекторный фильтр; г — полосовой фильтр

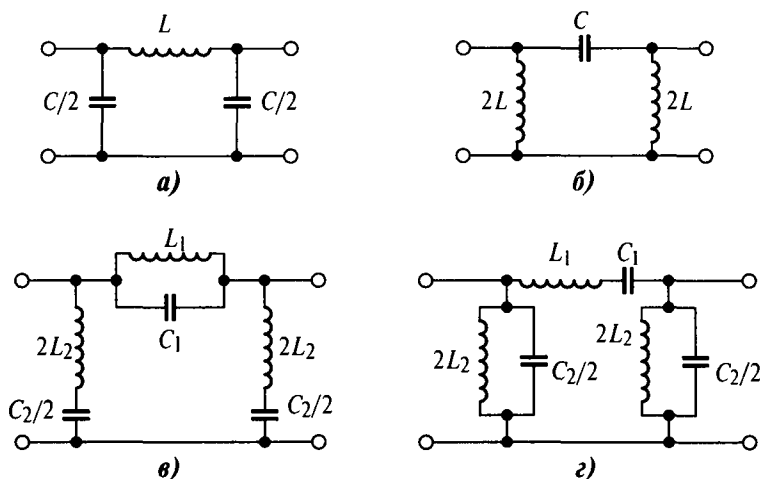


Рис. 9.34. Π -образные секции фильтра: а — фильтр нижних частот; б — фильтр верхних частот; в — режекторный фильтр; г — полосовой фильтр

фильтры, построенные из Т-образных секций, а на **Рис. 9.34** — фильтры, построенные из Π -образных секций. Для фильтров нижних частот частота среза определяется следующим выражением:

$$f_c = \frac{1}{\pi\sqrt{LC}}.$$

Для фильтров верхних частот:

$$f_c = \frac{1}{4\pi\sqrt{LC}}.$$

Для полосовых и режекторных фильтров центр полосы определяется как $\sqrt{f_1 f_2}$, где f_1 — резонансная частота последовательно включенной цепочки, а f_2 — резонансная частота параллельно включенной цепочки.

Дополнительная литература: Niewiadomski S. (1989), *Filter handbook*, (Heinemann-Newnes).

22. Активные фильтры¹

При использовании пассивных фильтров появляются проблемы, связанные с ослаблением сигнала и согласованием последовательных секций. Эти проблемы успешно решаются при помощи активных фильтров, в состав которых входят операционные усилители.

Дополнительная литература: Hilburn J.L., Johnson D.E. (1973), *Manual of Active Filter Design*, McGraw-Hill.

¹ Активные фильтры имеют более высокие характеристики разделения полос пропускания и заграждения, чем пассивные. Не имеют в своем составе индуктивностей L (прим. ред.).

Модуляция

23. Модуляция сигналов постоянного тока

При работе с сигналами постоянного тока низкого уровня могут возникнуть проблемы, связанные с дрейфом нуля операционных усилителей и внешними наводками. Их влияние может быть уменьшено при помощи модуляции сигнала, т.е. преобразования сигнала постоянного тока в сигнал переменного тока. Один из способов модуляции — превращение сигнала постоянного тока в серию импульсов равной длительности, высота которых определяется уровнем входного сигнала. Этот процесс называется **амплитудно-импульсная модуляция**. Альтернативой этому является **широтно-импульсная модуляция**, при которой импульсы одинаковой амплитуды вырабатываются через равные промежутки времени, но их длительность пропорциональна уровню напряжения в данный момент времени (**Рис. 9.35**).

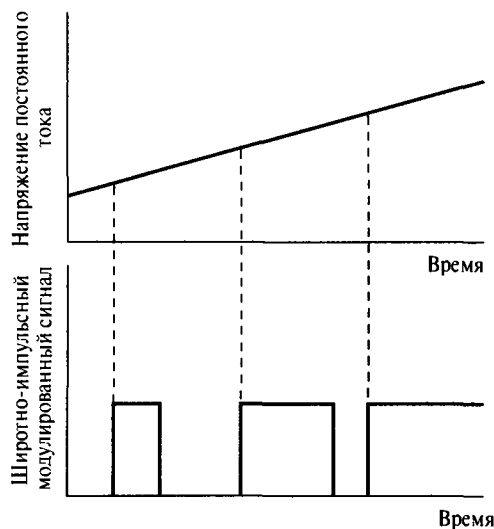


Рис. 9.35. Широтно-импульсная модуляция

24. Модуляция сигналов переменного тока

Уравнение для синусоидальной волны может быть записано в виде:

$$v = V \sin(\omega t + \varphi),$$

где v — напряжение в некоторый момент времени t , V — максимальное значение или амплитуда переменного напряжения, ω — круговая частота, определяемая как *частота* $\times 2\pi$, а φ — фазовый угол. Информационный сигнал модулирует этот более высокочастотный сигнал, называемый несущей волной. При **амплитудной модуляции** амплитуда несущей волны изменяется в соответствии с величиной информационного сигнала (**Рис.**

9.36). При **фазовой модуляции** фаза несущего сигнала φ изменяется в соответствии с величиной информационного сигнала. При **частотной модуляции** круговая частота несущего сигнала ω изменяется в соответствии с величиной информационного сигнала (Рис. 9.37). И частотная, и фазовая модуляция дают один и тот же результат — модулированную волну с частотой, которая зависит от величины входного напряжения.

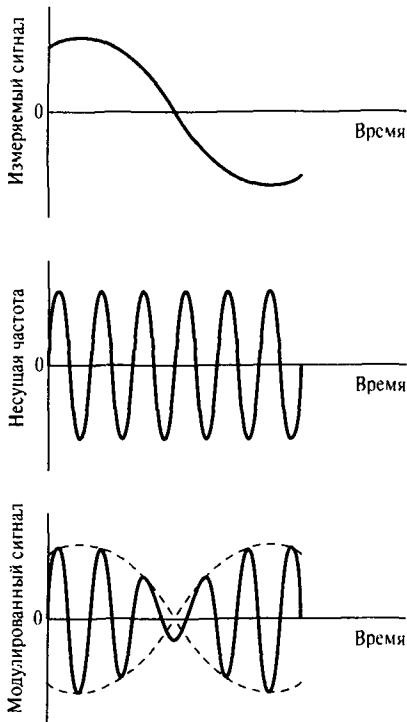


Рис. 9.36. Амплитудная модуляция

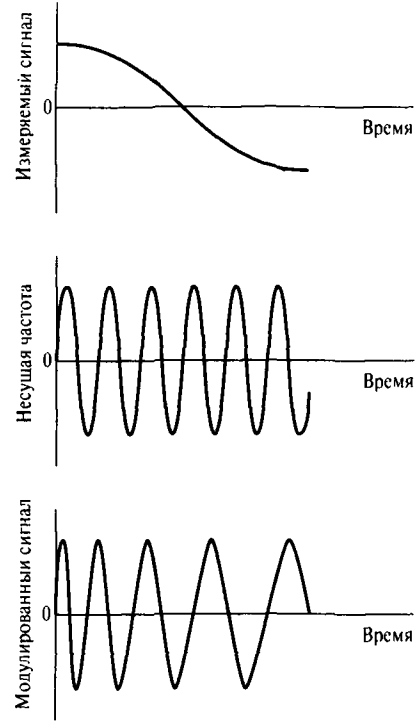


Рис. 9.37. Частотная модуляция

Аналого-цифровое преобразование

25. Аналого-цифровые преобразователи

При аналого-цифровом преобразовании (АЦП) входной сигнал связан с выходным следующей зависимостью:

$$V_A \approx V_R (b_1 2^{-1} + b_2 2^{-2} + b_3 2^{-3} + \dots + b_n 2^{-n}), \quad (1)$$

где V_A — напряжение на аналоговом входе, V_R — опорное напряжение, $b_1, b_2, \dots, b_n$ — цифровые выходы, n — число таких выходов. Все эти выходы вместе и составляют двоичное слово, соответствующее величине аналогового сигнала¹. Так как вы-

¹ АЦП состоит из 3 процедур: *дискретизации* по времени, *квантования* по уровню и *кодирования* (прим. ред.).

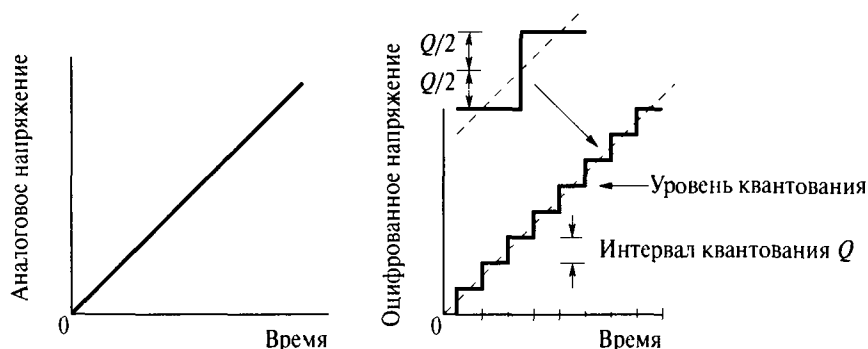


Рис. 9.38. Аналоговый сигнал и его цифровой эквивалент

ходной сигнал преобразователя растет ступенчато, то и вышеприведенное уравнение имеет знак $\approx$ (**Рис. 9.38**). Термин **квантование** используется для обозначения преобразования непрерывного аналогового сигнала в ступенчатый дискретный выходной сигнал. Каждая ступенька или уровень напряжения такого выходного сигнала называется **уровнем квантования**. **Интервал квантования** — это разность уровней напряжения между двумя соседними ступеньками. Интервал квантования равен выходному сигналу, создаваемому младшим значащим битом двоичного входного слова. Так как квантованный сигнал может меняться только ступенчато, то возникает погрешность АЦП, называемая **погрешностью квантования**, которая изменяется в диапазоне плюс—минус половина интервала квантования Q , т.е. $\pm 0.5Q$. Эта погрешность квантования может рассматриваться как шум, добавленный к аналоговому напряжению, поэтому его иногда также называют **шумом квантования**. Погрешность квантования или шум квантования могут быть уменьшены при использовании преобразователя, работающего с большим количеством разрядов.

Длина двоичного слова определяется **дискретностью** (разрешением) элемента, т.е. самым маленьким изменением сигнала V_A , которое приведет к изменению выходного сигнала. Если аналого-цифровой преобразователь работает с длиной слова, равной n разрядам, то изменение от 0 до 1 в b_n разряде и есть минимальное изменение выходного сигнала, и, следовательно, дискретность может быть определена как:

$$\text{Дискретность} = V_R 2^{-n}.$$

Максимальное значение аналогового напряжения, или **полный диапазон шкалы**, определяется словом, у которого все разряды установлены в 1, т.е.

Максимальное значение $V_A = V_R (1 \times 2^{-1} + 1 \times 2^{-2} + 1 \times 2^{-3} + \dots + 1 \times 2^{-n})$.

Значение в скобках равно $(1 - 2^{-n})$, следовательно:

Максимальное значение $V_A = V_R (1 - 2^{-n})$.

Для длины слова более 4 разрядов выражение в скобках определяется значением, очень близким к единице, поэтому максимальное значение аналогового напряжения практически определяется величиной опорного напряжения.

Время преобразования аналого-цифрового преобразователя — это время, которое необходимо преобразователю для создания на выходе двоичного слова после того, как на его вход поступил аналоговый сигнал.

Существует несколько методов построения аналого-цифровых преобразователей. **Метод последовательного приближения** (метод поразрядного взвешивания) заключается в том, что приблизительно 1000 раз в секунду производится съем значений входного аналогового напряжения. Одновременно преобразователь вырабатывает напряжение, значение которого сравнивается с величиной входного напряжения. Если между этими сигналами будет существовать рассогласование, то напряжение преобразователя будет увеличено на величину, равную напряжению младшего разряда. Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока напряжение, вырабатываемое преобразователем, не будет соответствовать входному напряжению. Таким образом, выходной сигнал преобразователя определяется количеством шагов приближения. **Метод линейно возрастающего напряжения** (метод одностадийного интегрирования) заключается в преобразовании сигнала напряжения во временной сигнал. В начале процесса измерений преобразователь начинает вырабатывать линейно возрастающее напряжение (**Рис. 9.39**), которое постоянно сравнивается с входным напряжением. Одновременно с этим вырабатывается стартовый импульс, открывающий логическую схему, которая позволяет временным импульсам поступать на вход счетчика. Линейное напряжение будет расти до тех пор, пока оно не станет равным входному напряжению. В момент равенства этих напряжений вырабатывается еще один управляющий импульс, закрывающий доступ временных импульсов на вход счетчика. Таким образом, счетчик подсчитывает количество временных импульсов от начала измерений до момента равенства линейного напряжения и входного сигнала. Это подсчитанное количество импульсов и есть мера величины входного напряжения.

В вышеописанных методах аналоговый сигнал преобразуется в цифровой вид в дискретные моменты времени. Остальные методы основаны на том, что перед преобразованием в цифровой вид

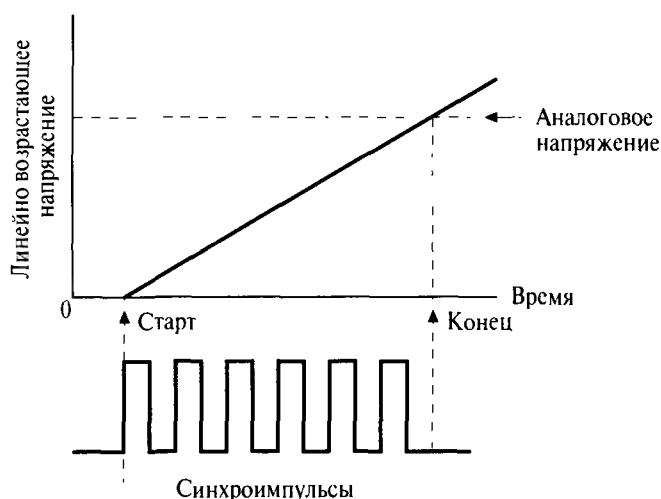


Рис. 9.39. Аналого-цифровой преобразователь, использующий метод линейно возрастающего напряжения

аналоговый сигнал интегрируется в течение какого-то промежутка времени. При использовании **метода двухстадийного интегрирования** входной сигнал заряжает конденсатор в течение фиксированного интервала времени, равного, например, одному циклу сетевой частоты. После этого входной сигнал отключается от конденсатора, и на его место подключается источник опорного напряжения, под действием которого будет происходить разряд конденсатора. Так как разряд конденсатора происходит с постоянной скоростью, зависящей от величины опорного напряжения, то измерив время, за которое разность потенциалов на конденсаторе упадет до нуля, можно судить о величине входного сигнала. Измерение времени разряда конденсатора осуществляется при помощи счетчика тактовых импульсов фиксированной частоты.

Дополнительная литература: Heap N. W., Martin G.S. (1982), *Introductory Digital Electronics*, The Open University Press.

26. Цифро-аналоговые преобразователи

При цифро-аналоговом преобразовании (ЦАП) входной цифровой сигнал связан с выходным аналоговым сигналом V_A следующей зависимостью:

$$V_A \approx V_R (b_1 2^{-1} + b_2 2^{-2} + b_3 2^{-3} + \dots + b_n 2^{-n}),$$

где V_R — опорное напряжение. Длина входного слова — это n разрядов, а $b_1, b_2, \dots, b_n$ — значения соответствующих разрядов. Максимальное значение аналогового выходного напряжения получается тогда, когда все значения разрядов $b_1, b_2, \dots, b_n$ равны единице.

Величина шага изменения (инкремент) аналогового напряжения определяется изменением значения младшего разряда b_n от 0 к 1. Таким образом,

$$\text{Инкремент аналогового напряжения} = V_R 2^{-n}.$$

Существуют два основных типа цифро-аналоговых преобразователей: суммирующий преобразователь и многозвенный преобразователь. В **суммирующем цифро-аналоговом преобразователе** цифровое слово загружается в двоичный регистр, выходы которого используются для подключения опорного напряжения к ряду резисторов, подсоединенных к входу операционного усилителя (**Рис. 9.40**). Набор резисторов имеет следующие значения: $1R, 2R, 4R, \dots, 2^{n-1}R$, где n — длина входного слова. Значения резисторов являются «двоично взвешенными», т.е. определяются рядом значений $2^0, 2^1, 2^2, \dots$ и т.д. Младший значащий разряд управляет включением или выключением резистора $2^{n-1}R$ в зависимости от того, равен этот разряд единице или нулю, в то время как старший значащий разряд управляет включением первого резистора R . Суммирующие цифро-аналоговые преобразователи редко используются в случаях, когда длина слова превышает шесть разрядов. Это связано с трудностями подбора точных значений резисторов больших номиналов, которые необходимы для создания набора резисторов требуемого диапазона. **Многозвенные цифро-аналоговые преобразователи** (**Рис. 9.41**) используют резистивные цепочки $R-2R$ и не имеют проблем с подбором больших номиналов резисторов, так как все резисторы имеют значения R или $2R$. В каждой точке соединения звеньев эти резисторы делят ток пополам. Включение или выключение звеньев определяется значениями разрядов входного слова. Выходной сигнал такого цифро-аналогового преобразователя определяется суммой токов в звеньях, т.е.

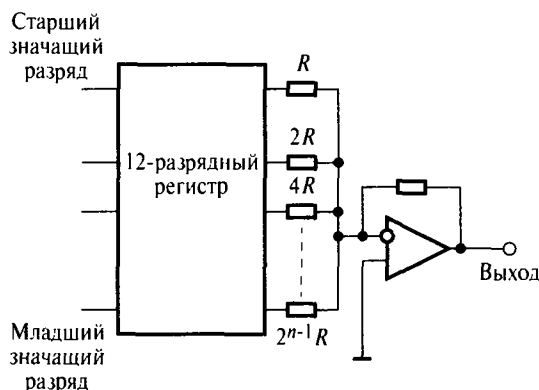


Рис. 9.40. Суммирующий цифро-аналоговый преобразователь

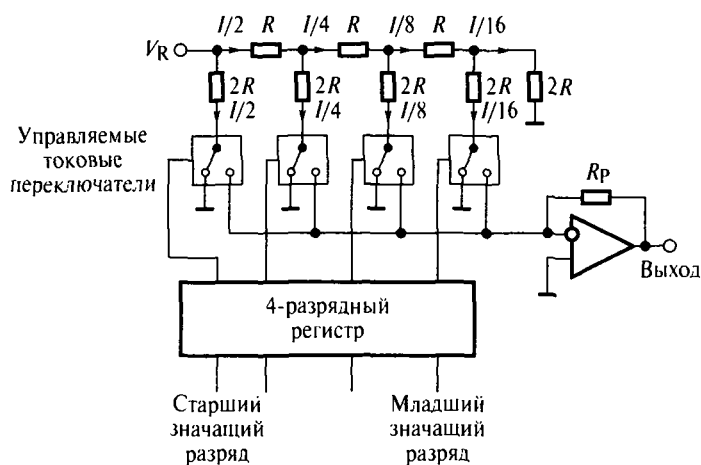


Рис. 9.41. Многозвенный цифро-аналоговый преобразователь

$$\text{Выходное напряжение} = -R_f \left(\frac{I}{2} + \frac{I}{4} + \frac{I}{8} + \dots \right).$$

Дополнительная литература: Heap N.W., Martin G.S. (1982), *Introductory Digital Electronics*, The Open University Press.

27. Устройства выборки и хранения

Во время аналого-цифрового преобразования аналоговый сигнал не должен меняться до тех пор, пока преобразователь не закончит полный цикл работы. По этой причине и необходимо использовать **устройства выборки и хранения**. Это устройство запоминает значение аналогового входного сигнала и хранит его до окончания аналого-цифрового преобразования. В простейшем случае это может быть конденсатор, включенный параллельно входу, который заряжается до уровня входного аналогового напряжения. Затем эта разность потенциалов «удерживается» до тех пор, пока аналого-цифровой преобразователь не примет это значение. Следующие термины используются для описания характеристики устройств выборки и хранения. **Время захвата** — это время, которое необходимо для зарядки конденсатора до уровня входного сигнала. **Время перехода от режима выборки в режим хранения** — это время, которое необходимо для изменения режима работы устройства или зарядки, или разрядки конденсатора. **Время удержания** — это интервал времени, в течение которого устройство выборки и хранения может удерживать заряд, потеряв не больше определенного количества процентов от его первоначального значения.

Дополнительная литература: Heap N.W., Martin G.S. (1982), *Introductory Digital Electronics*, The Open University Press.

28. Аналоговые мультиплексоры

Часто бывает необходимость проводить измерения аналоговых сигналов от нескольких источников. Вместо того, чтобы строить для каждого источника свою отдельную измерительную систему, можно использовать мультиплексор с одним устройством выборки и хранения и одним аналого-цифровым преобразователем (Рис. 9.42). **Мультиплексор** — это переключательное устройство, позволяющее по очереди выбирать каждый из входов. Основная проблема при использовании мультиплексоров — это **перекрестные наводки**, которые возникают между близко расположенными входными линиями.



Рис. 9.42. Аналого-цифровое преобразование с использованием мультиплексора

10. УСТРОЙСТВА ОТОБРАЖЕНИЯ

Устройства отображения можно разделить на две группы: **индикаторы**, которые дают текущую визуальную индикацию измеряемой величины, и **регистраторы**, которые записывают выходной сигнал в течение интервала времени, выдавая при этом долговременный документ. Обе группы можно подразделить на две подгруппы приборов: **аналоговые и цифровые**. В **Табл. 10.1** приведена классификация устройств отображения, описанных в этой главе.

Табл. 10.1. Устройства отображения

Устройство отображения		Индикатор		Регистраторы	
		Аналоговый	Цифровой	Аналоговый	Цифровой
1	Магнитоэлектрический измеритель	*			
2	Цифровой измеритель		*		
3	Регистратор с прямой записью			*	
4	Гальванометрический регистратор с прямой записью			*	
5	Гальванометрический регистратор с опорной призмой			*	
6	Ультрафиолетовый гальванометрический регистратор			*	
7	Потенциометрический регистратор			*	
8	Двухкоординатный регистратор			*	
9	Электронно-лучевой осциллограф	*			
10	Двухлучевой осциллограф	*			
11	Стробоскопический осциллограф	*			
12	Осциллограф с запоминающей ЭЛТ		*		
13	Монитор			*	
14	Алфавитно-цифровой дисплей		*		
15	Матричный принтер				*
16	Записывающее устройство на магнитной ленте прямого действия			*	
17	Записывающее устройство на магнитной ленте с частотной модуляцией			*	
18	Цифровое записывающее устройство на магнитной ленте				*

Измерители

1. Магнитоэлектрический измеритель (гальванометр)

Магнитоэлектрический измеритель состоит из катушки, расположенной в постоянном магнитном поле, которое всегда направлено под прямым углом к сторонам катушки, и это направление не зависит от угла поворота катушки (**Рис. 10.1**). Рассмотрим прямоугольную катушку, у которой длина вертикальной стороны равна L , а длина горизонтальной стороны — b . По этой катушке протекает ток I . Катушка помещена в магнитное поле с равномерной плотностью магнитного потока B , который всегда направлен под прямым углом к вертикальным частям катушки. При протекании тока через катушку на эти части действуют силы, которые равны и направлены в противоположные стороны. Под действием этих сил катушка поворачивается, так как появляется отклоняющий момент вращения.

Сила F , действующая на вертикальную сторону, равна произведению BIL . Таким образом, момент вращения катушки относительно центральной вертикальной оси можно определить следующим образом:

$$\text{Момент вращения} = BIL \times \frac{1}{2}b + BIL \times \frac{1}{2}b = BILb .$$

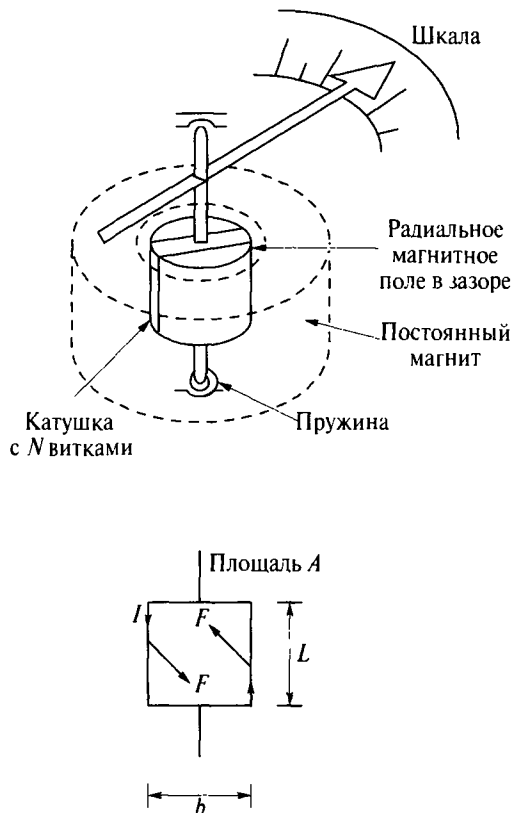


Рис. 10.1. Магнитоэлектрический измеритель

Так как произведение Lb — это площадь катушки A , то момент вращения равен BIA . Это момент вращения катушки, имеющей один виток. А если катушка состоит из N витков, то ее момент вращения будет равен $NBIA$. Так как для каждого конкретного гальванометра величины NB и A являются постоянными, можно записать следующее:

$$\text{Момент вращения} = K_c I,$$

где K_c — постоянная величина для каждого гальванометра.

Этот отклоняющий момент пропорционален току и заставляет катушку поворачиваться. Однако существует вращающий момент, направленный в противоположную сторону, который создается пружиной, прикрепленной к центральной вертикальной оси катушки. Этот момент называется возвращающим. Величина этого момента зависит от угла поворота катушки и равна:

$$\text{Возвращающий момент} = K_s \theta,$$

где K_s — постоянная пружины. Катушка будет поворачиваться до тех пор, пока эти два момента не уравновесятся, тогда:

$$K_c I = K_s \theta.$$

Отсюда видно, что угловое отклонение катушки θ пропорционально силе тока I .

Магнитоэлектрические приборы обычно обладают сопротивлением порядка сотен Ом. Для измерения разных диапазонов напряжения и тока могут использоваться шунты, добавочные сопротивления и выпрямители (см. главу 9). Точность таких измерителей зависит от температуры, наличия вблизи посторонних магнитных полей или железосодержащих материалов, способа установки измерителя, трения в узлах, точности градуировки шкалы на заводе-изготовителе и т.д. При снятии показаний измерителя возникают также дополнительные погрешности: погрешность от параллакса (снятие показаний не под прямым углом к шкале) и погрешность приближения, возникающая в процессе оцифровки значений между градуировочными делениями шкалы. Таким образом, точность таких измерителей лежит в диапазоне $\pm 0.1 \dots 5\%$. Время переходных процессов в таких приборах определяется временем затухания колебаний катушки до получения установившегося угла отклонения и обычно не превышает нескольких секунд.

2. Цифровой измеритель

Цифровые приборы выдают результаты измерений в виде последовательности цифр, поэтому в них отсутствуют погрешности от параллакса и погрешности из-за интерполяции показаний. Цифровые измерители имеют в своем составе аналого-ци-

фровой преобразователь с подсоединенным к нему цифровым индикатором. Более подробно этот вопрос рассмотрен в пункте 25 главы 9 и в главе 14. Очевидно, что точность цифровых измерителей выше, чем у аналоговых, ее можно оценить как $\pm 0.005\%$. Цифровые измерители обладают сопротивлением порядка 10 МОм. Важной характеристикой таких измерителей является скорость оцифровки аналоговых входных сигналов, которая определяется типом используемого АЦП.

Регистраторы с прямой записью

3. Регистратор с прямой записью

В регистраторах с прямой записью, например, таких как диаграммные самописцы, перо перемещается по равномерно движущейся бумаге, записывая текущее значение измеряемой величины (**Рис. 10.2**). В приборах, регистрирующих давление, может записываться перемещение конца трубки Бурдона или мембраны. В приборах, записывающих текущую температуру, для управления пером может быть использована деформация биметаллической пластинки. В самописцах часто используют круговую диаграммную бумагу, которая вращается с постоянной скоростью, обычно составляющей один оборот за 12 часов, за 24 часа или за 7 суток. Так как перемещение пера осуществляется по дуге или окружности, значения температуры или давления, изменяющиеся во времени, обычно регистрируются на самописце в виде искривленной радиальной линии. Диаграммная бумага перемещается с постоянной круговой скоростью, следовательно, за равные интервалы времени происходит ее перемещение на одинаковые углы, отсюда и определяется взаимосвязь измеряемой величины со временем. Очевидно также, что величина пути, пройденного пером за опре-

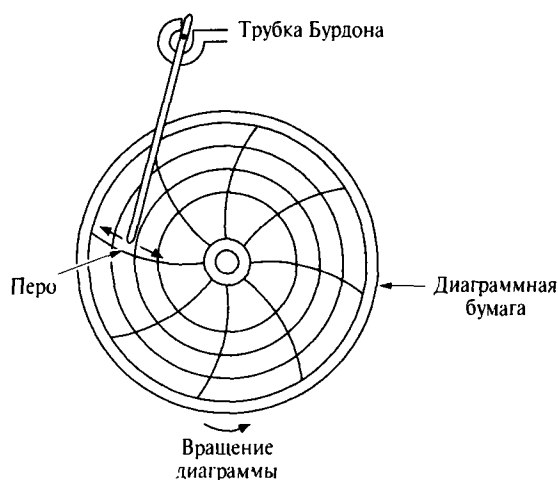


Рис. 10.2. Регистратор с прямой записью

деленный промежуток времени, зависит от положения пера относительно центра диаграммы. Это затрудняет интерпретацию результатов, и самые большие проблемы возникают при определении значений, расположенных близко к центру диаграммы, где радиальные линии находятся очень близко друг к другу. После завершения одного оборота диаграммную бумагу необходимо заменить, иначе произойдет наложение регистрируемых данных. Возможна одновременная регистрация до четырех отдельных переменных. Точность таких регистраторов обычно составляет порядка $\pm 0.5\%$ от отклонения сигнала на всю шкалу.

Гальванометрические регистраторы

В самописцах гальванометрического типа регистрируется угол поворота катушки, являющейся частью магнитоэлектрического гальванометра. Протекающий по катушке ток заставляет ее поворачиваться до тех пор, пока момент вращения, созданный действием этого тока, не уравнивается возвращающим моментом пружины, свернутой в виде спирали. Угол поворота катушки θ пропорционален силе протекающего через нее тока (см. пункт 1 и **Рис. 10.1**), поэтому

$$K_c I = K_s \theta,$$

где K_c равно NBA (произведению числа витков в катушке на плотность магнитного потока и на площадь катушки), этот коэффициент K_c также называется постоянной гальванометра; K_s — это постоянная пружины, связывающая угол поворота катушки с действующим на нее возвращающим моментом спиральной пружины.

Все вышеописанные характеристики являются статическими, т.е. зависимость между входным током и выходным изменением угла поворота катушки справедлива только в случае, когда через катушку течет установившийся ток, все переходные процессы закончены, и катушка нагружена на сопротивление бесконечно большой величины, т.е. цепь нагрузки разомкнута. Рассмотрим, что получится, если ток, протекающий через гальванометр, резко возрастет от 0 до некоторого значения I . Момент вращения, создаваемый этим током, будет равен $K_c I$. Вращению катушки будет мешать возвращающий момент спиральной пружины, прикрепленной к оси катушки. Таким образом, результирующее действие этих двух моментов вращения на катушку может быть представлено в виде $(K_c I - K_s \theta)$. Оно приводит к возникновению в системе углового ускорения α . Так как результирующий момент вращения равен произведению момента инерции J на угловое ускорение, можно записать, что:

$$J\alpha = K_c I - K_s \theta.$$

Измерительная цепь гальванометрического регистратора может быть представлена в виде эквивалентной схемы, показанной на **Рис. 10.3**. Из нее видно, что величина тока в цепи определяется следующим выражением:

$$I = \frac{V_t}{R_t + R_r},$$

где V_t — это эквивалент выходного напряжения устройства, включающего в себя датчик и преобразователь сигнала; R_t — это эквивалент внутреннего сопротивления этого устройства, а R_r — это эквивалент внутреннего сопротивления цепи регистрирующего устройства.

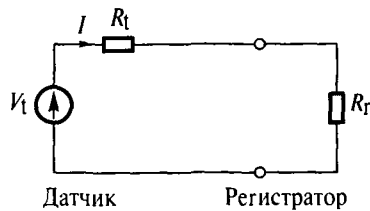


Рис. 10.3. Эквивалентная схема

Вращение катушки в магнитном поле приводит к тому, что в этой катушке будет наводиться вторичная э.д.с. E . Проводник длиной L будет всегда вращаться таким образом, что его направление движения будет перпендикулярно магнитному полю. Следовательно, в нем будет наводиться э.д.с. E , которая определяется следующим образом: $E = BLv$, где v — это линейная скорость движения вертикальной стороны катушки. Так как $v = r\omega$, где r — радиус траектории движения, а ω — угловая скорость, то $E = BLr\omega$. Из того, что радиус траектории движения равен $b/2$, у катушки — две стороны, а N — это число витков катушки, следует, что

$$E = 2NBL(b/2)\omega = NBA\omega = K_c\omega.$$

Таким образом, напряжение в цепи определяется как $(V_t - K_c\omega)$. Тогда ток в цепи I в течение процесса поворота катушки равен:

$$I = \frac{V_t - K_c\omega}{R_t + R_r}.$$

Следовательно, подставив это выражение для тока I в уравнение для углового ускорения, получим:

$$J\alpha = \frac{K_c(V_t - K_c\omega)}{R_t + R_r} - K_s\theta.$$

Так как $\omega = d\theta/dt$, а $\alpha = d^2\theta/dt^2$, то

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{K_c^2}{J(R_l + R_r)} \frac{d\theta}{dt} + \frac{K_s\theta}{J} = \frac{K_c V_l}{J(R_l + R_r)}.$$

Это дифференциальное уравнение второго порядка описывает движение катушки гальванометра во время переходного процесса. Система имеет собственную круговую частоту колебаний $\omega_n = 2\pi f_n$, которая определяется как

$$\omega_n = \sqrt{(K_s / J)}.$$

Коэффициент затухания этой системы равен:

$$\text{Коэффициент затухания} = \frac{K_c^2}{2(K_s J)^{1/2} (R_l + R_r)}.$$

Отсюда видно, что коэффициент затухания зависит от сопротивления датчика. Следовательно, затуханием системы можно управлять при помощи подсоединения дополнительных резисторов последовательно или параллельно датчику.

Если коэффициент затухания меньше 1, т.е. ниже критического (см. главу 4 и **Рис. 4.3**), происходит отклонение катушки на угол, больший, чем установившееся значение, т.е. происходит перерегулировка системы (см. **Табл. 10.1**), после чего катушка возвращается назад в требуемое положение. Если коэффициент затухания больше 1, то для того, чтобы катушка отклонилась на нужный угол, соответствующий установившимся условиям, ей требуется достаточно длительное время.

Табл. 10.1. Перерегулировка и коэффициент затухания

Коэффициент затухания	% перерегулировки
1.00	0.0
0.91	0.1
0.82	1.2
0.72	4
0.62	8.4
0.50	16.5
0.40	25.0

Когда катушка гальванометра занимает установившееся положение, обе производные $d\theta/dt$ и $d^2\theta/dt^2$ равняются 0. Следовательно,

$$\frac{K_s\theta}{J} = \frac{K_c V_l}{J(R_l + R_r)}.$$

Таким образом, чувствительность по напряжению в установившемся режиме можно определить как:

$$\text{Чувствительность по напряжению} = \frac{\theta}{V_t} = \frac{K_c}{K_s(R_t + R_r)}.$$

Таким образом, чувствительность регистратора в установившемся режиме может быть изменена подсоединением дополнительных резисторов последовательно или параллельно датчику. При рассмотрении параллельного подсоединения дополнительных резисторов необходимо учитывать не только изменение эквивалентного сопротивления R_t , но также и напряжение на входе регистрирующего устройства. В этом случае эквивалентное напряжение в цепи датчика уменьшится пропорционально уменьшению сопротивления цепи, которое можно определить как $R_p/(R_p + R_t)$, где R_p — это величина резистора, подсоединенного параллельно датчику.

Реакция гальванометра на синусоидальные входные сигналы различной частоты зависит от величины его собственной частоты и от значения коэффициента затухания в системе (**Рис. 10.4**).

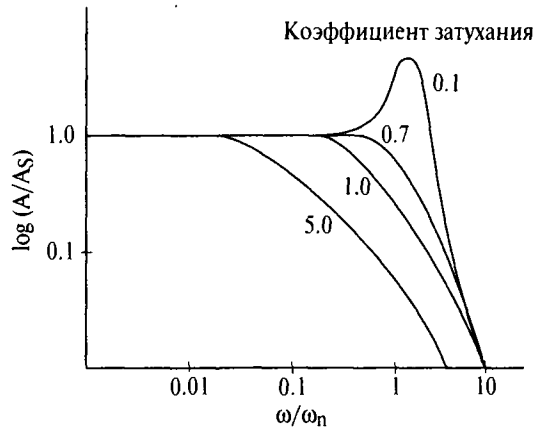


Рис. 10.4. Амплитудно-частотная характеристика гальванометра

Отношение амплитуды сигнала A к значению сигнала в установившемся режиме A_s может быть определено следующим образом:

$$\frac{A}{A_s} = \frac{1}{[(1 - \omega_r^2)^2 + (2\zeta\omega_r)^2]^{\frac{1}{2}}},$$

где $\omega_r = \omega/\omega_n$ — это отношение круговой частоты к собственной частоте. Оптимальное значение коэффициента затухания для получения максимальной полосы частот приблизительно равно 0.7.

Таким образом, гальванометр при использовании в области высоких частот должен обладать высоким значением собственной частоты, и коэффициент затухания в системе должен быть порядка 0.7. Собственная частота может быть увеличена при снижении момента инерции катушки J , что достигается уменьшением линейных размеров катушки (ее длины и высоты). Однако такое изменение катушки может привести к увеличению коэффициента затухания системы. Другой способ повышения собственной частоты — это увеличение коэффициента K . Правда, в этом случае может пострадать чувствительность гальванометра. Поэтому гальванометры, рассчитанные для работы в области высоких частот, как правило, обладают невысокой чувствительностью.

4. Гальванометрический регистратор прямого считывания

Существует несколько вариантов диаграммных самописцев. В случае механизмов **прямого считывания** перо отслеживает поворот катушки гальванометра (**Рис. 10.5**). Здесь перемещение пера можно описать следующей формулой:

$$Y = R \sin \theta,$$

где R — длина плеча пера.

Отсюда видно, что зависимость между током в катушке, который пропорционален углу поворота, и перемещением пера нелинейная. Если угол поворота катушки не превышает $\pm 10^\circ$, погрешность нелинейности будет меньше 0.5%. Так как перо движется не по прямой, а по дуге, то для построения графика необходимо использовать диаграммную бумагу с криволинейными координатными осями. Правда, в этом случае добавляются трудности с интерпретацией результатов. Точность таких систем составляет порядка $\pm 2\%$ от отклонения на всю шкалу. Входное сопротивление равно около 10 кОм. Рабочий частотный диапазон определяется интервалом 0...50 Гц (0 — соответствует постоянному току).

5. Гальванометрический регистратор с опорной призмой

На **Рис. 10.6** показан вариант гальванометрического регистратора, где вместо использования диаграммной бумаги с криволинейными координатными осями для уменьшения нелинейности применяется опорная призма. По этой опорной призме равномерно передвигается термочувствительная бумага, на которой нагретой иглой ставятся отметки, соответствующие текущему значению измеряемой величины. Бумага может быть пропитана специальным химическим составом, чтобы в момент контакта с нагретой иглой происходило изменение цвета бумаги именно в этом месте. Бумага может быть покрыта также специальным термочувствительным слоем, выжигаемым при соприкоснове-

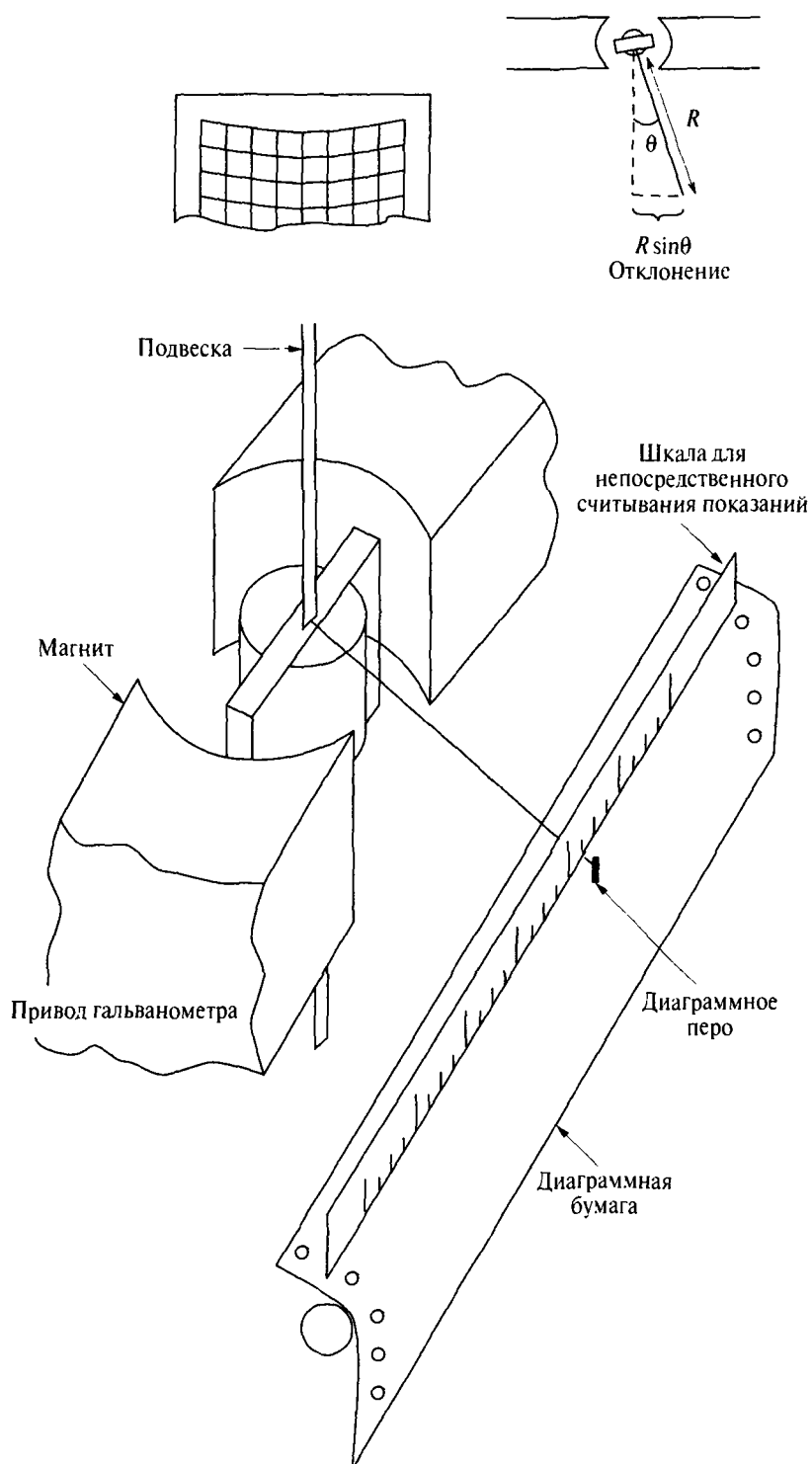


Рис. 10.5. Гальванометрический регистратор

нии с нагретой иглой. При отклонении катушки на угол θ на термобумаге останется след на расстоянии Y от нулевого положения, которое можно определить как:

$$Y = R \operatorname{tg} \theta.$$

Зависимость между током в катушке, который пропорционален углу поворота, и перемещением пера нелинейная. Если угол поворота катушки не превышает $\pm 10^\circ$, погрешность нелинейности будет меньше 1%. Точность таких систем составляет порядка $\pm 2\%$ от отклонения на всю шкалу. Входное сопротивление равно около 10 кОм. Рабочий частотный диапазон определяется интервалом 0...50 Гц.

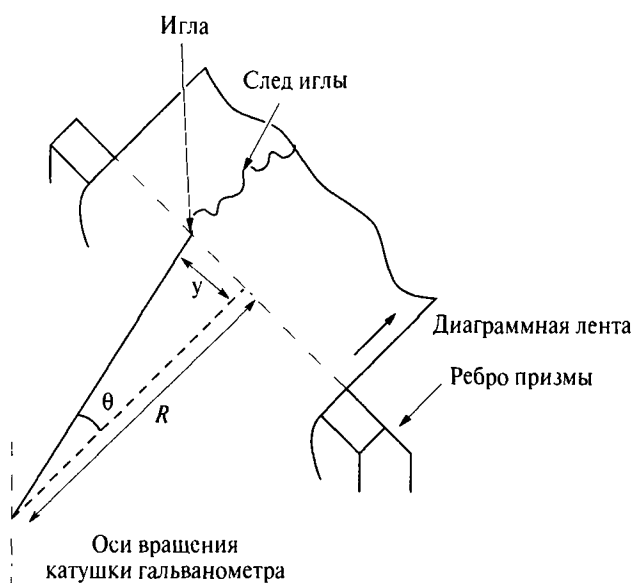


Рис. 10.6. Гальванометрический регистратор, использующий опорную призму

6. Ультрафиолетовый гальванометрический регистратор

В состав ультрафиолетового регистратора входит маленькое зеркало, прикрепленное на нити подвеса катушки гальванометра (Рис. 10.7). Ультрафиолетовый луч падает на зеркало. Когда катушка поворачивается, отраженный луч отклоняется на диаграммной бумаге от нулевой линии. Здесь применяется фоточувствительная диаграммная бумага, на которой после проявления будет отражено изменение измеряемой величины во времени. Часто на одном магните близко друг к другу устанавливается несколько гальванометрических блоков (их число может быть 6, 12 или 25), что дает возможность одновременно записывать изменение во времени нескольких переменных.

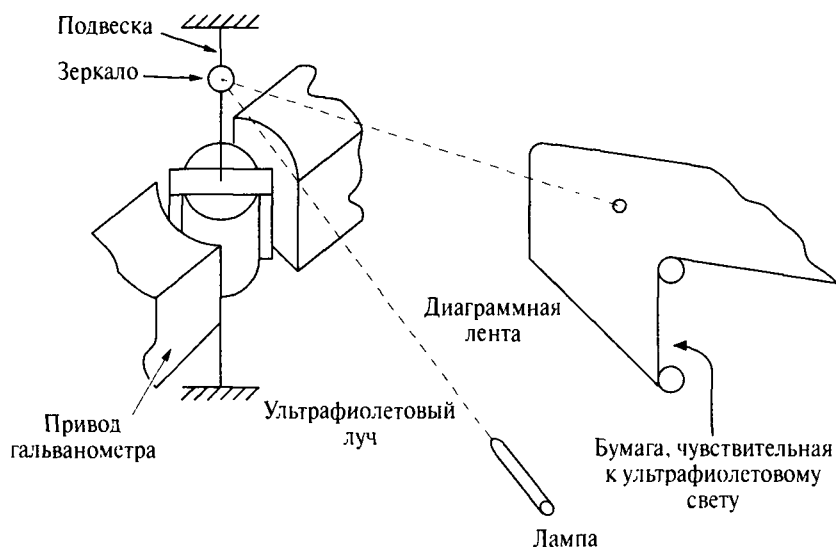


Рис. 10.7. Ультрафиолетовый гальванометрический регистратор

Чувствительность такого регистратора зависит от требуемой частотной полосы, которая определяется характеристиками используемого гальванометра (это обсуждалось ранее). При частотной полосе $0 \dots 50$ Гц чувствительность обычно составляет 5 см/мВ , при этом сопротивление катушки равно приблизительно 80 Ом . При частотной полосе до 5 кГц чувствительность обычно равна около 0.0015 см/мВ при сопротивлении катушки порядка 40 Ом . Верхний предел рабочих частот для таких приборов приблизительно равен 13 кГц . Точность таких систем составляет порядка $\pm 2\%$ от отклонения на всю шкалу.

Регистраторы со следящей системой

7. Потенциометрический регистратор

Основной частью потенциометрического регистратора является самобалансирующий потенциометр (**Рис. 10.8**). При наличии на входе напряжения вал электродвигателя начинает вращаться, тем самым передвигая соединенное с ним перо. Перо будет продолжать двигаться до тех пор, пока не прекратится подача сигнала на электродвигатель. Перемещение пера приведет в движение соединенный с ним ползунок вдоль трека потенциометра. В результате этого на выходе потенциометра появится пропорциональная разность потенциалов, которая будет вычитаться из сигнала датчика при помощи операционного усилителя. Полученный сигнал используется для управления электродвигателем. Таким образом, перо остановится в положении, при котором разность между сигналом от датчика и потенциометра (т.е. пера) станет равна нулю.

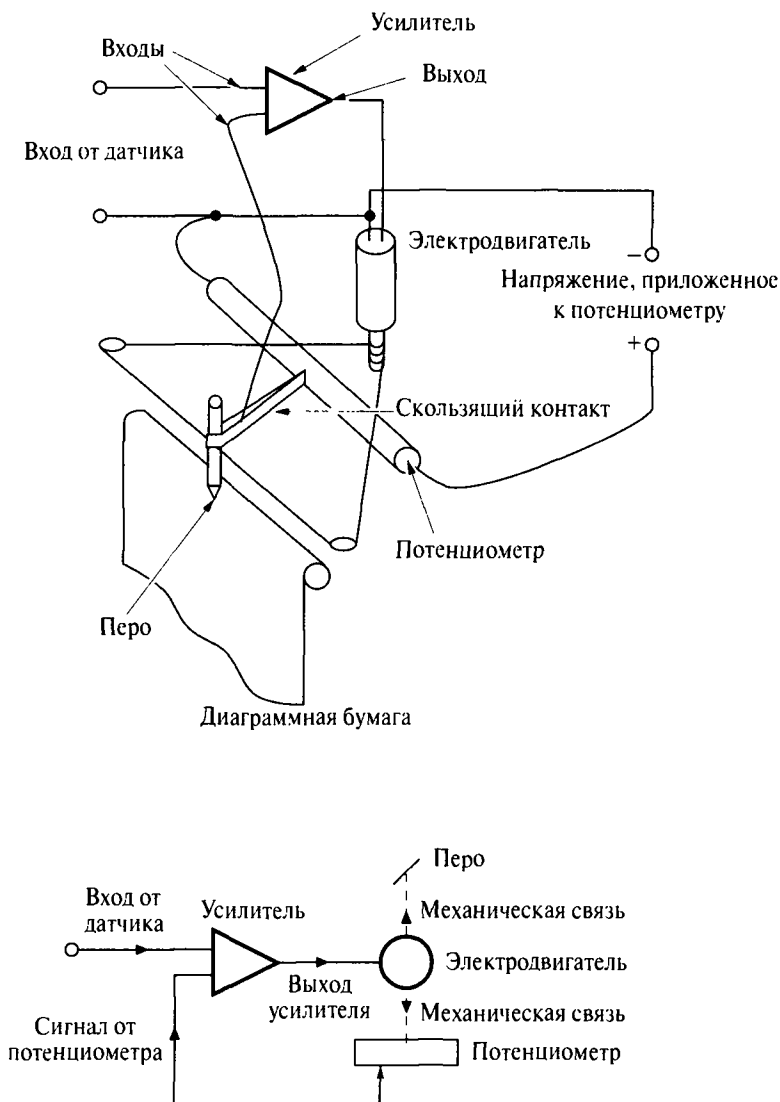


Рис. 10.8. Потенциометрический регистратор

Потенциометрический регистратор более надежный, чем гальванометрический; может быть многоканальным; имеет линейную зависимость между отклонением и входом от датчика; обычно имеет высокое входное сопротивление. Такие регистраторы по сравнению с гальванометрическими, как правило, имеют более высокую точность — приблизительно $\pm 0.1\%$ от всей шкалы показаний, но они достаточно медленные, т.е. обладают большим временем реакции на входное воздействие, и поэтому их рабочая полоса частот составляет $0 \dots 2$ Гц. Из-за трения в системе существует некоторая мертвая зона, т.е. для того, чтобы заставить мотор тронуться с места, к нему требуется приложить небольшой ток. Эта зона и есть порог чувствительности регистратора, который обычно равен около $\pm 0.3\%$ от всего диапазона.

8. Двухкоординатный регистратор

Двухкоординатный регистратор используется для отслеживания зависимости между двумя переменными, одна из которых необязательно должна быть временем. Потенциометрический регистратор может иметь одно перо, управляемое двумя моторами, один мотор управляет перемещением в горизонтальном направлении, а второй — перемещением в вертикальном направлении.

Электронно-лучевые трубки

9. Электронно-лучевой осциллограф

Электронно-лучевая трубка (ЭЛТ) (Рис. 10.9) состоит из электронной пушки, которая производит сфокусированный луч электронов, и отклоняющей системы. При нагревании катод пушки начинает испускать электроны. Количество электронов, формирующих электронный луч и определяющих яркость свечения точки на экране трубки, зависит от разности потенциалов, приложенной к модулятору. Электроны ускоряются при пролете вдоль трубки из-за разности потенциалов между анодом и катодом. Последующие электроды служат для фокусировки луча. Электронный луч, достигая экрана, покрытого люминофором, формирует на нем небольшое световое пятно. Луч отклоняется в вертикальном направлении разностью потенциалов, приложенной к вертикально отклоняющим пластинам, и в горизонтальном направлении разностью потенциалов, приложенной к горизонтально отклоняющим пластинам.

Экран покрыт люминофором, который начинает светиться от ударов электронов. От момента достижения электронным лучом люминофорного покрытия до появления его свечения требуется некоторое время, существует также время послесвечения люминофора (Рис. 10.10). Интервал времени, необходимый для того,

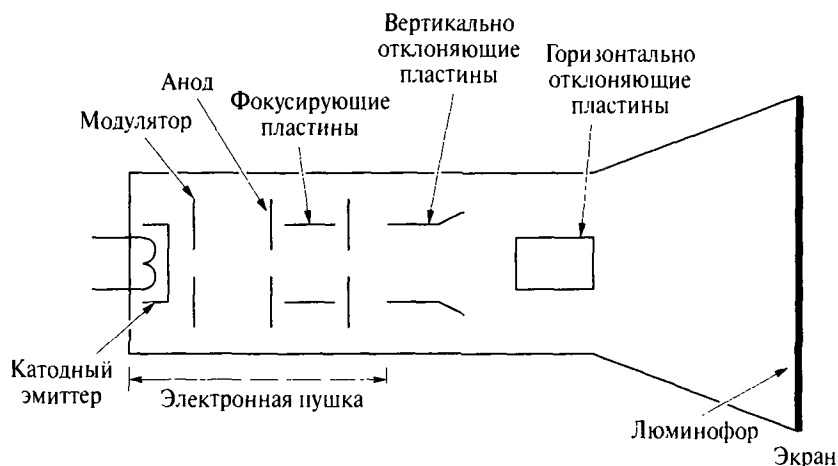


Рис. 10.9. Электронно-лучевая трубка

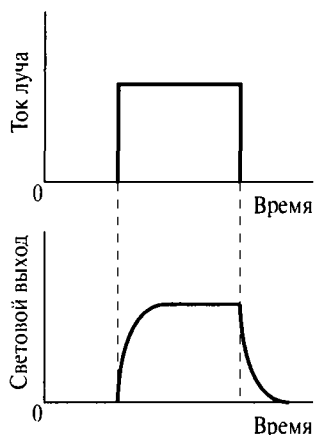


Рис. 10.10. *Время «зажигания» люминофора и время его послесвечения*

чтобы уровень света на выходе трубки снизился до некоторого определенного значения от его первоначальной величины, называется **временем послесвечения**, или **инерционностью** (Табл. 10.2).

Табл. 10.2. *Люминофорные покрытия экрана*

Тип	Свечение экрана	Относительная яркость [%]	Время послесвечения до уровня 0.1% [мсек]	Назначение
P.1	Желто-зеленое	50	95	Общего назначения. В настоящее время в основном заменен на P.31
P.2	Сине-зеленое	55	120	Удобен для отображения медленноменяющихся сигналов
P.4	Белое	50	20	Используется для телевизоров
P.7	Сине-белое	35	1500	Из-за большого времени послесвечения используется для регистрации очень медленно меняющихся сигналов
P.11	Синее	35	20	Из-за короткого времени послесвечения используется для фотографирования и для регистрации быстро меняющихся процессов
P.31	Зеленое	100	32	Общего назначения. Самый яркий люминофор

Назначение вертикально отклоняющих пластин — отклонять электронный луч в вертикальном направлении. Для получения разных коэффициентов отклонения используется переключаемый аттенюатор и усилитель. Одним из основных качеств осциллографа является возможность выбора различных коэффициентов отклонения луча в диапазоне 5 мВ...20 В на одно деление шкалы. Для того, чтобы наблюдать только переменную составляющую

сигнала при наличии высоковольтной постоянной составляющей, на входе осциллографа может быть включен блокирующий конденсатор. Когда усилитель работает в режиме усиления переменного сигнала, его полоса пропускания составляет 2 Гц...10 МГц; в режиме усиления постоянного сигнала полоса пропускания составляет 0...10 МГц. Входное сопротивление осциллографа обычно шунтируется конденсатором 20 пФ и равно около 1 МОм.

При подсоединении внешних цепей к вертикально отклоняющему входу из-за несогласования нагрузки может возникнуть помеха, искажающая входной сигнал. Эта помеха может быть уменьшена, если для подсоединения внешних цепей использовать коаксиальный кабель. Однако емкость используемого коаксиального кабеля и измерительного щупа, подсоединенного к этому кабелю, может быть достаточной, особенно на высоких частотах, для изменения входного импеданса осциллографа, что приведет к значительному влиянию нагрузочных цепей на измерительный тракт. Существует несколько разновидностей щупов для осциллографов, которые спроектированы так, чтобы увеличивать входной импеданс и, следовательно, уменьшать влияние нагрузки. Широко распространенный **пассивный щуп для измерения напряжения** является десятикратным аттенуатором (10:1). Этот щуп, как правило, состоит из резистора, равного 9 МОм, и конденсатора (**Рис. 10.11**). Такой измерительный щуп не только уменьшает емкость нагрузки, но понижает также и чувствительность по напряжению, так как такой щуп является R — C делителем напряжения (см. главу 9 и **Рис. 9.28в**). В состав **активного щупа для измерения напряжения** входит полевой транзистор, это позволяет решить проблему, связанную со снижением чувствительности по напряжению. Другой разновидностью щупов является **щуп для измерения тока** (**Рис. 10.12**). Такой измерительный щуп может быть укреплен вокруг проводника, по которому протекает ток. Физически такой щуп никак не влияет ни на один элемент, входящий в состав цепи, по которой протекает измеряемый ток. Такой тип щупа известен как токовый трансформатор.

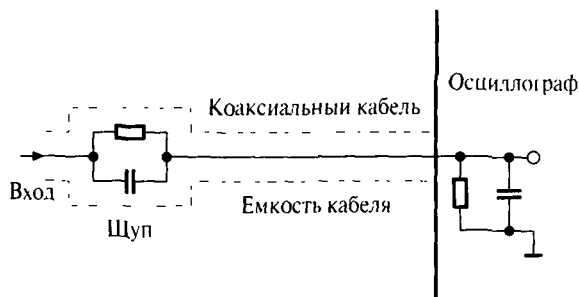


Рис. 10.11. Пассивный щуп для измерения напряжения

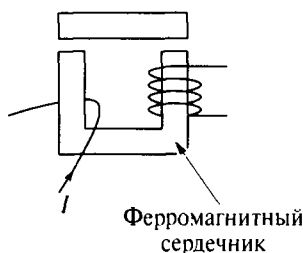


Рис. 10.12. Щуп для измерения тока

Назначение горизонтально отклоняющих пластин — отклонять электронный луч в горизонтальном направлении. Эти пластины обычно управляются сигналом от внутреннего генератора, который разворачивает электронный луч слева направо с постоянной скоростью (прямой ход луча). Затем происходит очень быстрое возвращение луча в исходную точку, которое называется обратным ходом луча. Обратный ход луча настолько мал по длительности, что не заметен на экране (**Рис. 10.13**). Постоянная скорость прямого хода луча означает, что расстояние, пройденное лучом по экрану осциллографа в горизонтальном направлении, прямо пропорционально затраченному на это времени. Таким образом, можно утверждать, что горизонтальная ось X — это и есть *ось времени*. Длительность горизонтальной развертки осциллографа, как правило, может меняться в диапазоне 0.2 мкс...1 с на одно деление шкалы.

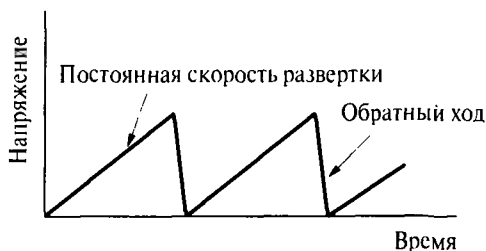


Рис. 10.13. Горизонтальная развертка в форме пилообразного сигнала

При измерении периодических сигналов для получения равномерной линии развертки на экране осциллографа необходимо синхронизировать входной сигнал с сигналом генератора развертки при помощи *запускающей цепи*. Настраивая эту цепь, можно запускать генератор развертки при достижении определенного уровня входного сигнала, причем таким образом, что это будет происходить либо только при нарастании входного сигнала, либо только при его убывании. Таким образом, запускающая цепь будет срабатывать в определенной фазе периодического входного сигнала (**Рис. 10.14**) и в этот момент генерировать импульс, запускающий генератор развертки. Сиг-

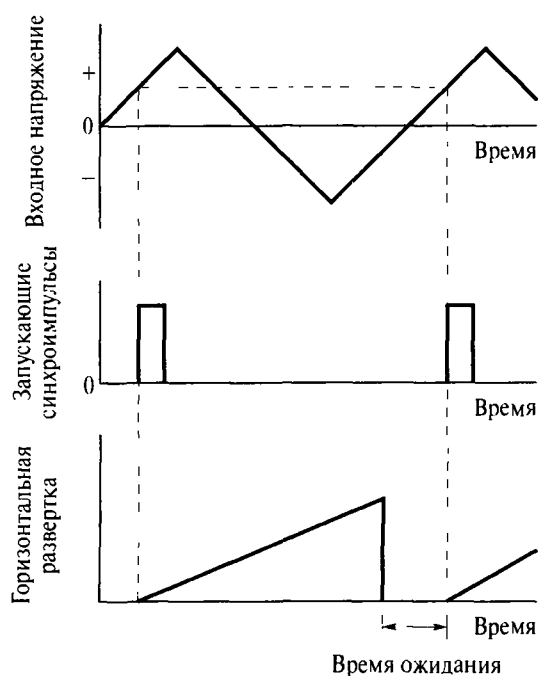


Рис. 10.14. Синхронизация

нал развертки определяет ход луча по экрану осциллографа, и, так как он начинается всегда в одной и той же фазе входного сигнала, это дает возможность синхронного отображения входного сигнала.

Дополнительная литература: Hickman I. (1990), *Oscilloscopes* (3rd edn), Butterworth-Heinemann.

10. Двухлучевой осциллограф

Двухлучевой осциллограф дает возможность одновременно наблюдать на экране два отдельных входных сигнала. Такой осциллограф может иметь две независимые электронные пушки и, следовательно, два электронных луча. Каждый луч имеет свои собственные вертикально отклоняющие пластины, но общие горизонтально отклоняющие пластины, и в результате этого общую горизонтальную развертку. Двухлучевой осциллограф может также иметь только одну электронную пушку, и в этом случае вертикально отклоняющие пластины переключаются от одного входа к другому каждый раз при включении синхронизации генератора развертки. Такой режим работы называется **режимом попеременного доступа**. Альтернативой этому режиму является **режим прерываний**, при котором происходит более частый опрос входных сигналов. Частота переключения от одного входа к другому в таких осциллографах обычно равна около 150 Гц.

Дополнительная литература: Hickman I. (1990), *Oscilloscopes* (3rd edn), Butterworth-Heinemann.

11. Стробоскопический осциллограф

Верхний предел частотного диапазона для обычных осциллографов равен величине порядка 100 МГц. Стробоскопический осциллограф дает возможность отслеживать высокочастотные сигналы. В таких осциллографах происходит непрерывное отображение измерений, взятых в различных фазах входного сигнала в течение нескольких периодов. Частота опроса в стробоскопических осциллографах может быть в сто раз больше частоты входного сигнала, и поэтому верхний предел частотного диапазона увеличивается в несколько сот раз.

Дополнительная литература: Hickman I. (1990), *Oscilloscopes* (3rd edn), Butterworth-Heinemann.

12. Осциллограф с запоминающей ЭЛТ

В осциллографах с запоминающей ЭЛТ отображенный сигнал остается на экране даже после исчезновения входного сигнала, поэтому здесь необходимо производить специальную очистку экрана для его удаления. **Бистабильная запоминающая** ЭЛТ имеет три электронные пушки. Две из них, называемые считывающими электронными прожекторами, работают все время и направляют на экран поток электронов, обладающих низкой скоростью. Экран состоит из частичек люминофора на диэлектрической пластине, укрепленной на проводящей подложке. Поток электронов, движущихся с невысокой скоростью, отрицательно заряжает частички люминофора. После чего люминофор перестает светиться. Третья электронная пушка, записывающая, излучает электроны, двигающиеся с высокой скоростью, которые обладают достаточной кинетической энергией для преодоления силы отталкивания от отрицательно заряженных частичек люминофора и выталкивания из них электронов. Эти электроны собираются и поглощаются проводящей подложкой, расположенной сзади слоя с люминофором. В результате потери электронов частички люминофора становятся положительно заряженными. Этот положительный заряд на них сохраняется даже после того, как записывающая пушка прекращает испускание электронов, потому что частички люминофора продолжают «бомбардироваться» электронами от считывающих электронных пушек, и эти электроны при приближении к положительному заряду начинают ускоряться. В результате этого ускорения их кинетическая энергия становится достаточной для продолжения эмиссии этих электронов через проводящую подложку. Таким образом, частички люми-

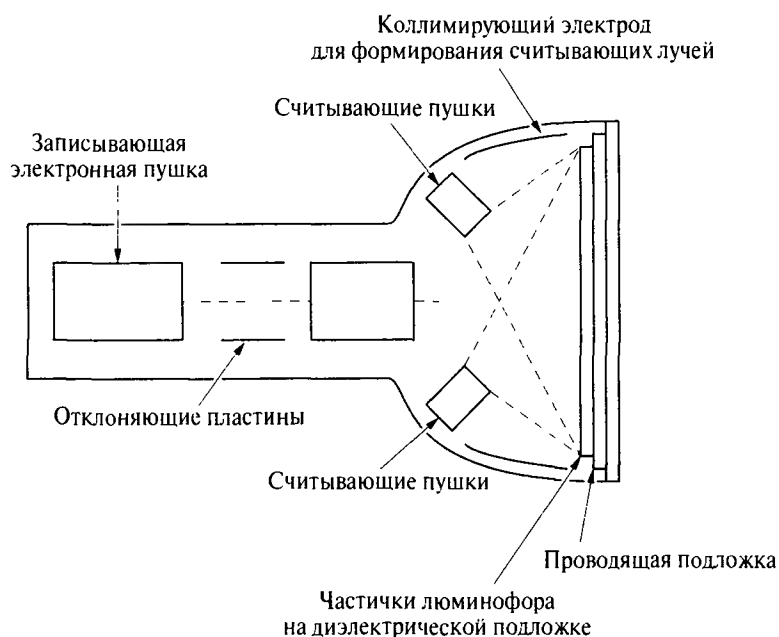


Рис. 10.15. Бистабильная запоминающая ЭЛТ

нофора будут светиться до тех пор, пока они будут положительно заряженными. Только после специальной процедуры снятия положительного заряда с частиц люминофора они перестанут светиться.

Дополнительная литература: Hickman I. (1990), *Oscilloscopes* (3rd edn), Butterworth-Heinemann.

13. Мониторы

Монитор — это устройство отображения, в состав которого входит электронно-лучевая трубка. Монитор может отображать цифровые, буквенные и символьные данные. В мониторах пилообразное напряжение прикладывается на горизонтально и на вертикально отклоняющие пластины (**Рис. 10.16**).

Сигнал на горизонтально отклоняющих пластинах управляет движением электронного луча по экрану монитора слева направо и быстро возвращает луч в исходное положение. Сигнал на вертикально отклоняющих пластинах управляет относительно медленным перемещением луча с верхней части экрана в его нижнюю часть с последующим быстрым возвратом в верхний левый угол монитора. В результате этих двух управляющих сигналов точка от электронного луча будет перемещаться по зигзагообразной линии с верхнего левого угла экрана в нижний правый. Во время этого перемещения электронный луч будет то включаться, то выключаться в соответствии с управляющим сигналом на модуляторе, формируя «картинку» на экране монитора.

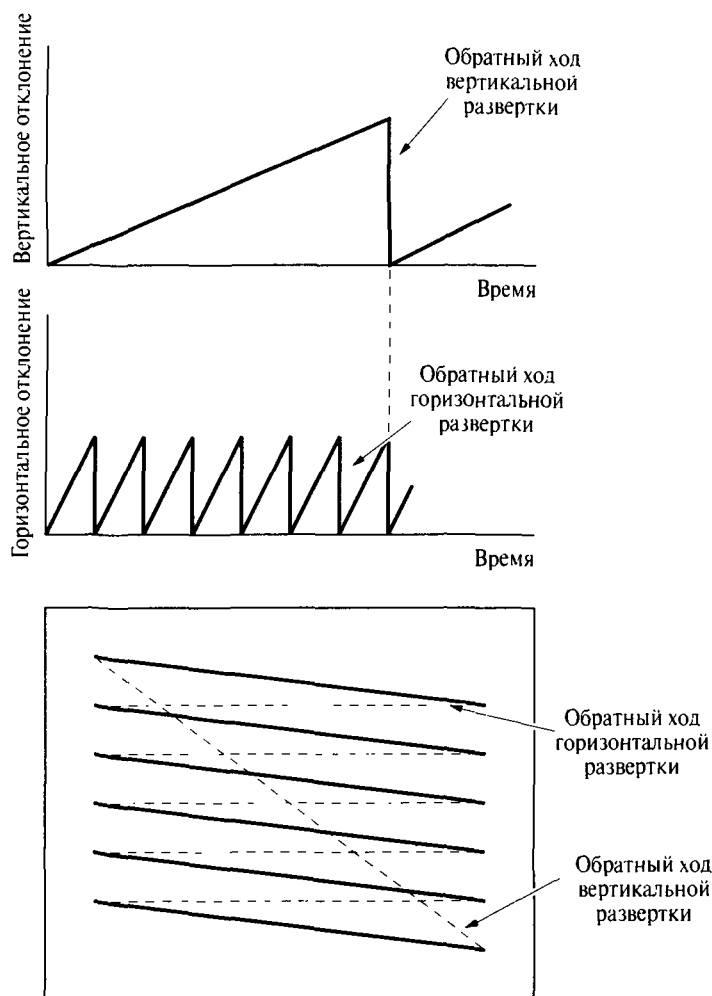


Рис. 10.16. Монитор

Чтобы сделать «картинку» на экране устойчивой, необходимо поддерживать режим перезарядки частиц люминофора. Такой тип мониторов конструируется на основе электронно-лучевых трубок с *регенерацией изображения*. Альтернативный способ «фиксирования» изображения на экране — это использование *запоминающих* электронно-лучевых трубок.

В цветных мониторах экран состоит из групп точек трех разных видов люминофора: один вид светится красным цветом, второй — зеленым цветом, а третий — синим. Три электронных луча разворачиваются на экране, каждый луч отвечает за свой цвет. Если три луча включают все три вида люминофора в группе одновременно, то в этом месте экрана высветится белая точка; если включится только красный люминофор, точка будет соответственно красной и т.д.

Алфавитно-цифровые дисплеи

Алфавитно-цифровые дисплеи предназначены для отображения букв алфавита, цифр 0...9 и десятичной точки.

14. Устройство алфавитно-цифровых дисплеев

Несколько типов устройств может быть использовано для построения таких дисплеев. Два наиболее часто применяемых типа — это жидкокристаллические дисплеи и дисплеи на основе светоизлучающих диодов. Жидкокристаллические дисплеи состоят из пленки с жидкими кристаллами, помещенной между двумя прозрачными пластинами с нанесенными на них электродами (Рис. 10.17). Электроды состоят из сегментов, формирующих требуемый для отображения символ. Когда между электродами появляется разность потенциалов, жидкие кристаллы начинают рассеивать свет, который без этого прошел бы прямо через них. Таким образом, если свет падает на кристалл прямо или сбоку, площадь между электродами становится яркой, делая видимым отображаемый символ.

Светоизлучающие диоды начинают светиться, когда на них подано положительное напряжение. Диоды устанавливаются так, чтобы при подаче напряжения на определенные диоды можно было сформировать требуемый символ.

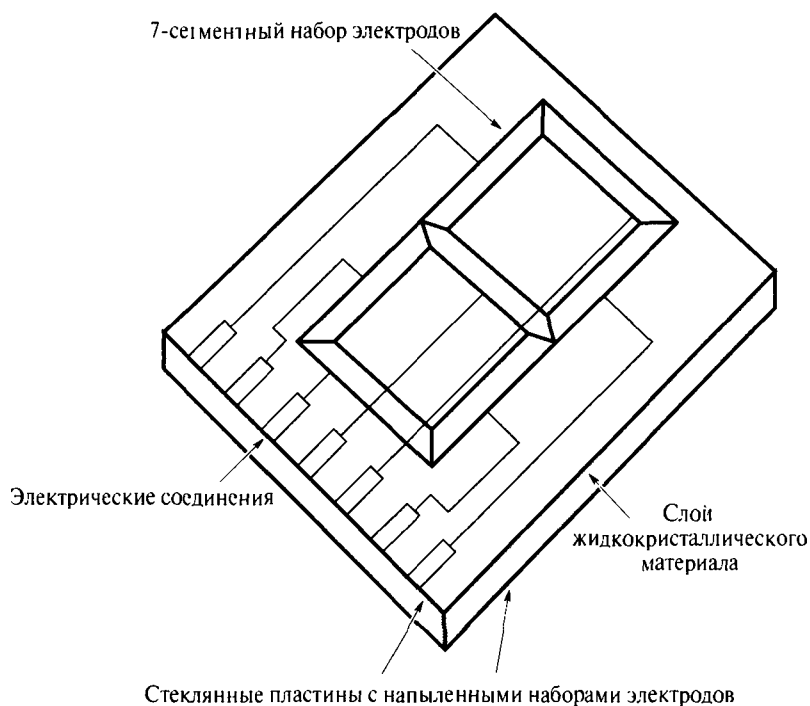


Рис. 10.17. Жидкокристаллический дисплей

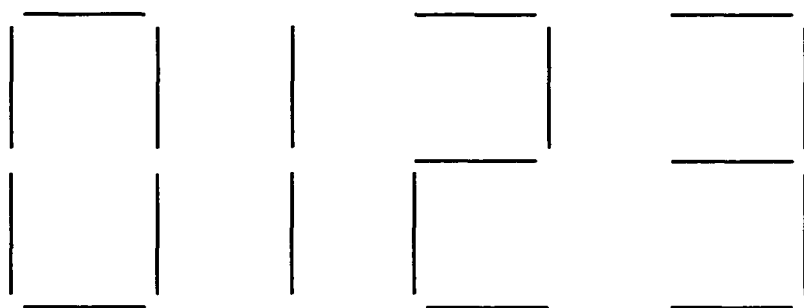
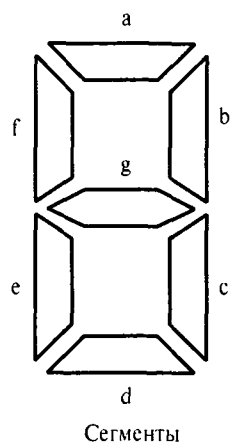


Рис. 10.18. Семисегментный дисплей

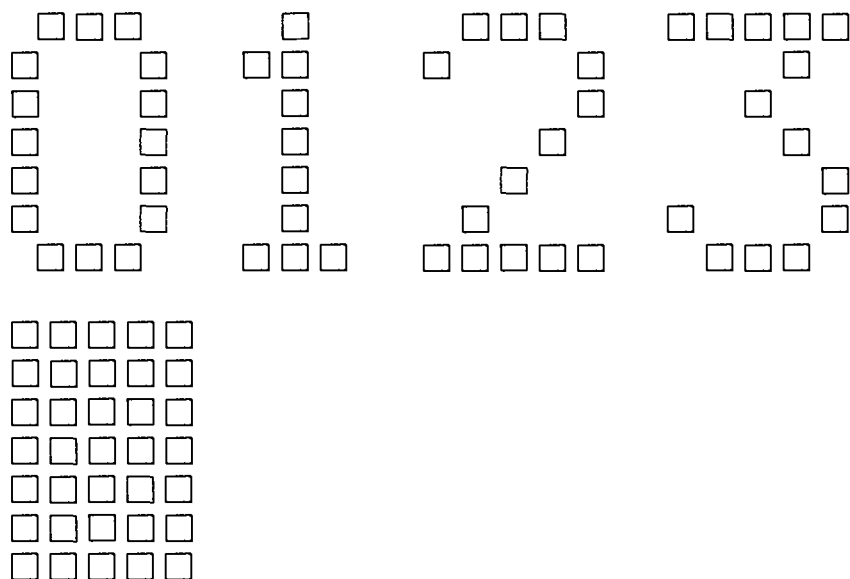


Рис. 10.19. Матрица дисплея, состоящая из 7×5 точек

Наиболее распространенная форма дисплейного элемента состоит из 7 сегментов, расположенных таким образом, что включением тех или иных сегментов формируется любой символ (Рис. 10.18). В Табл. 10.3 показано, как двоичный входной код может быть использован для управления включением/выключением соответствующих сегментов при отображении различных цифр. Другой способ отображения символов — использование точечных матриц размером 7×5 или 9×7 . Требуемые для отображения символы формируются активизацией соответствующих точек (Рис. 10.19).

Табл. 10.3. Семисегментный дисплей

Двоичный вход D C B A	Активируемые сегменты a b c d e f g	Отображаемое число
0000	1111110	0
0001	0110000	1
0010	1101101	2
0011	1111001	3
0100	0110011	4
0101	1011011	5
0110	0011111	6
0111	1110000	7
1000	1111111	8
1001	1110011	9

Дополнительная литература: Marston R. M. (1988), *Opto-electronics Circuits Manual*, Butterworth-Heinemann.

Печатающие устройства

15. Матричный принтер

Матричный принтер — это наиболее распространенное цифровое печатающее устройство, отображающее на своем выходе алфавитно-цифровые символы. Головка принтера обычно состоит из 9 или 24 иголок, расположенных вдоль вертикальной линии. Каждая иглока управляется электромагнитом. При подаче на электромагнит управляющего сигнала он выдвигает вперед соответствующую иглоку, которая упирается при этом в красящую ленту. Этот удар иглоки оставляет на листке бумаги, расположенной за красящей лентой, маленькую капельку краски. Символы формируются выдвижением соответствующих иголок во время перемещения головки принтера по бумаге.

Записывающие устройства на магнитной ленте

Записывающее устройство на магнитной ленте состоит из: записывающей головки, которая принимает входной сигнал и формирует на магнитной ленте соответствующую ему магнитную запись; головки воспроизведения, которая преобразует магнитную запись на ленте в электрический сигнал; механической части системы, которая перемещает магнитную ленту под головками с постоянной скоростью; узлов формирования сигнала, таких как усилители и фильтры. Записывающая головка имеет форму замкнутого сердечника из ферромагнитного материала, в котором есть узкая немагнитная вставка (Рис. 10.20).

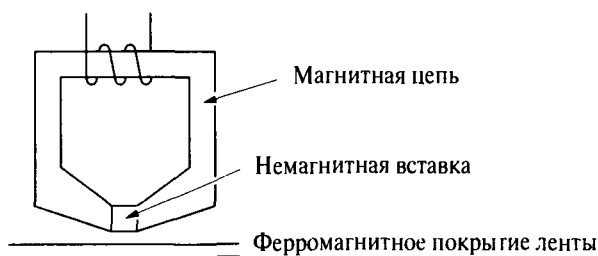


Рис. 10.20. Записывающая/воспроизводящая головка

Магнитная лента имеет гибкую пластиковую основу, покрытую тонким ферромагнитным слоем. При прохождении магнитной ленты рядом с немагнитной вставкой магнитный поток внутри сердечника и на самой ленте будет меняться пропорционально величине тока, протекающего в катушке головки. На Рис. 10.21 показана зависимость между остаточной магнитной индукцией на ленте, т.е. степенью ее остаточного магнетизма, и напряженностью магнитного поля. Таким образом,

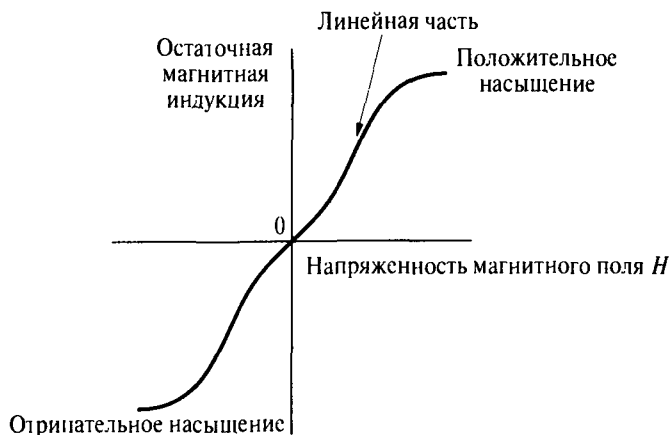


Рис. 10.21. График остаточного намагничивания ленты

магнитная запись, выполняемая на магнитной ленте, зависит от величины тока, протекающего по обмотке записывающей головки. Воспроизводящая головка имеет такую же конструкцию, что и записывающая головка. Когда элемент намагниченной ленты проходит зазор в головке, в сердечнике индуцируется магнитный поток. Изменение магнитного потока в сердечнике приведет к тому, что в катушке, намотанной вокруг сердечника, будет наводиться э.д.с. Таким образом, с выхода катушки можно снять электрический сигнал, соответствующий магнитной записи на ленте.

Обычно записывающее устройство имеет несколько записывающих головок, расположенных по ширине магнитной ленты. Таким образом, можно одновременно регистрировать несколько различных сигналов.

16. Записывающее устройство на магнитной ленте с прямой записью

При записи входной сигнал используется непосредственно для формирования остаточного магнетизма на ленте. В данном случае график зависимости между остаточной магнитной индукцией на ленте и напряженностью магнитного поля является нелинейным. Таким образом, при значениях входного тока, близких к нулю, появляются нелинейные искажения при формировании выходного сигнала. Эти искажения могут быть уменьшены **смещением входного сигнала сигналом постоянного тока**, для того чтобы сдвинуть его в более линейную часть графика (**Рис. 10.22а**). Альтернативой этому является добавление к входному сигналу высокочастотного сигнала переменного тока, т.е. **смещение сигналом переменного тока**, для того чтобы получить амплитудную модуляцию входного сигнала (**Рис. 10.22б**). Амплитудно-промодулированный входной сигнал сдвигается при этом в более линейную часть графика. Смещение входного сигнала называется подмагничиванием.

При подаче синусоидального сигнала подмагничивания с частотой f на записывающую головку происходит синусоидальное изменение остаточной магнитной индукции на ленте. Период синусоидального сигнала равен $1/f$, поэтому если лента движется с постоянной скоростью v , то за это время она пройдет расстояние v/f . Это расстояние называется **длиной волны подмагничивания**.

$$\text{Длина волны подмагничивания} = \frac{v}{f}.$$

Минимальный размер длины волны подмагничивания равен ширине рабочего зазора головки записывающего устройства. Та-

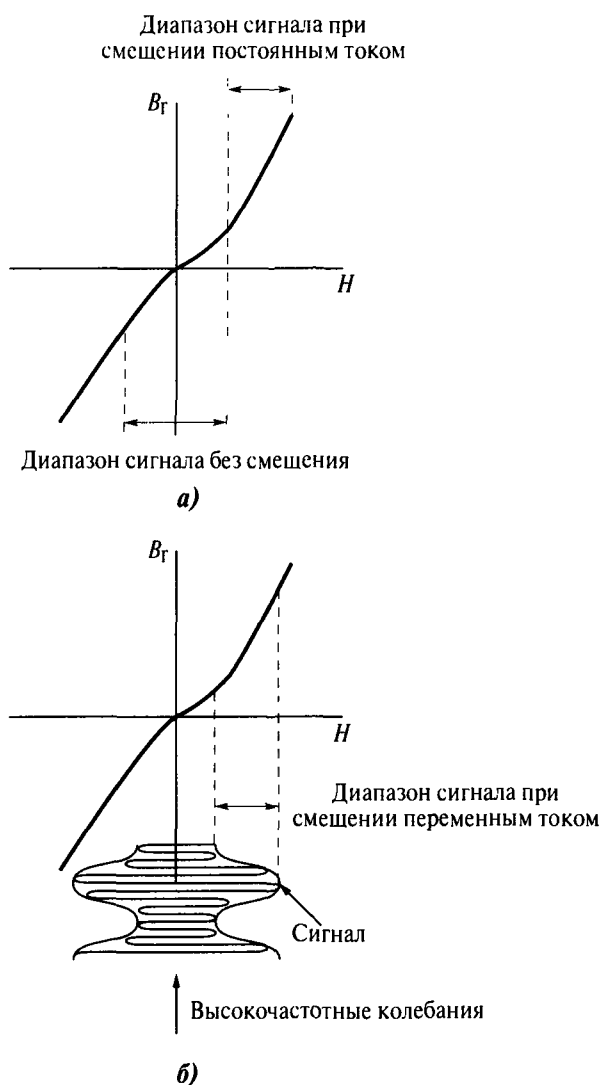


Рис. 10.22. *а — смещение постоянным током;
б — смещение переменным током*

ким образом, верхняя граница частотного диапазона записывающего устройства определяется скоростью движения магнитной ленты и шириной рабочего зазора. Обычно диапазон скоростей движения магнитной ленты равен 23...1500 мм/с, а ширина рабочего зазора равна 5 мкм, следовательно, верхний предел частотного диапазона лежит в пределах 4.6...300 кГц.

Для воспроизводящей головки справедливо следующее: синусоидальные изменения магнитного потока на магнитной ленте приведут к синусоидальному изменению магнитного потока Φ сердечника:

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t,$$

где $\omega = 2\pi f$, f — частота, Φ_m — амплитуда магнитного потока. Выходной сигнал воспроизводящей головки пропорционален скорости изменения магнитного потока Φ в сердечнике головки, т.е. $d\Phi/dt$. Следовательно, выходной сигнал головки воспроизведения пропорционален $\omega\Phi_m \cos \omega t$. Таким образом, выходной сигнал воспроизведения зависит не только от записанного на ленте магнитного потока, но и от частоты. Для сглаживания этого влияния используется усилитель с частотно-зависимой передаточной функцией, показанной на **Рис. 10.23**. Такой процесс называется **амплитудно-частотной коррекцией**.

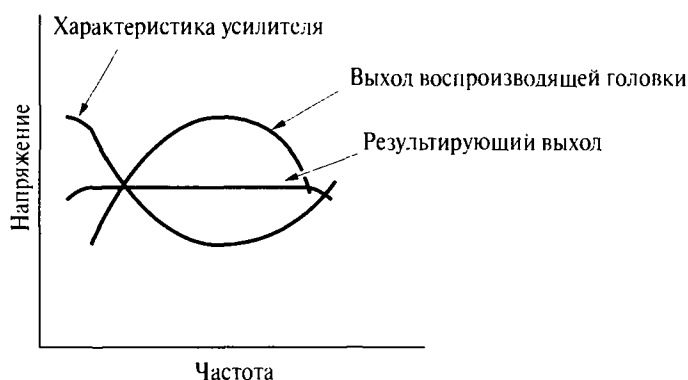


Рис. 10.23. Амплитудно-частотная коррекция

Последствием зависимости выходного сигнала головки воспроизведения от частоты является то, что на очень низких частотах выходной сигнал может быть очень мал и сравним с шумом, улавливаемым воспроизводящей головкой. Поэтому для таких записывающих устройств нижний предел частотного диапазона равен около 100 Гц.

17. Записывающее устройство на магнитной ленте с частотной модуляцией

При частотной модуляции несущая частота изменяется в соответствии с изменениями входного сигнала. Так как частота несущей высокая, таких проблем, как в предыдущем случае для низкочастотных сигналов, не возникает, поэтому записывающие устройства с частотной модуляцией могут использоваться вплоть до 0 Гц. Верхний предел частотного диапазона, однако, ниже, чем в случае амплитудной модуляции, обычно он равен около одной трети несущей частоты, т.е. находится в интервале 2...80 кГц. В записывающих устройствах с частотной модуляцией отношение сигнал/шум обычно лучше, чем в устройствах с прямой записью. Важным является контроль скорости магнитной ленты, так как неравномерность скорости может привести к существенным изменениям частоты.

18. Цифровое записывающее устройство на магнитной ленте

При цифровой записи сигналы записываются как закодированная комбинация двоичных разрядов. Наиболее распространенным является метод записи на магнитную ленту «без возврата к нулю». В таких системах магнитный поток, записываемый на пленку, равен либо величине положительного насыщения, либо величине отрицательного насыщения (см. **Рис. 10.21**). Изменения в магнитном потоке записываются в виде 1, а участки без изменений магнитного потока — в виде 0 (**Рис. 10.24**). Выходной сигнал, снимаемый с воспроизводящей головки, зависит от скорости изменения записанного на пленке магнитного потока, поэтому сигнал на выходе появляется только в момент изменения потока с 0 на 1 и, наоборот, с 1 на 0, следовательно, выходной сигнал представляет собой серию импульсов. Цифровая запись имеет ряд преимуществ по сравнению с аналоговой записью — это более высокая точность и относительная нечувствительность к случайным изменениям скорости ленты.

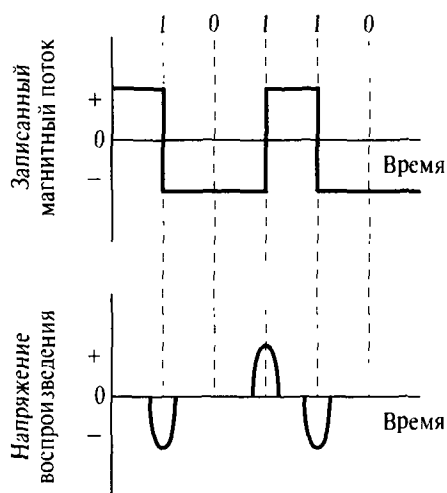


Рис. 10.24. Метод записи на магнитную ленту «без возврата к нулю»

Часть третья

Измерения

11. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ

В этой главе представлены некоторые из основных *методов*, используемых для *химического анализа*. В Табл. 11.1 представлен список описываемых методов и их основные характеристики.

Дополнительная литература: Notlingk B.E. (ed.) (1985), *Jones Instrument Technology*, vol. 2, *Measurement of Temperature and Chemical Composition* (4th edn), Butterworth-Heinemann; Willard H.H., Merrit L.L., Dean J.A. and Settle F.A. (1988), *Instrumental Methods of Analysis*, Wadsworth.

Хроматография

Хроматография — это метод разделения смесей на составляющие компоненты при прохождении подвижной фазы через (или над) стационарную фазу. Исследуемый образец вводится в подвижную фазу и при помощи нее переносится вдоль стационарной фазы. При этом компоненты образца постоянно взаимодействуют с неподвижной фазой до тех пор, пока не становятся разделенными. Подвижная фаза может быть жидкостью или газом, неподвижная фаза — жидкостью или твердым веществом.

1. Хроматография на бумаге

На Рис. 11.1 показан аппарат, используемый при хроматографическом анализе на бумаге. Возможны два варианта: либо жидкость опускается по бумаге (Рис. 11.1а), либо жидкость поднимается по бумаге (Рис. 11.1б). Капля анализируемой смеси наносится на бумагу, движение жидкости заставляет смесь разделяться, поэтому на бумаге образуется серия пятен на различном расстоянии от места ввода исходного образца. Локализация этих пятен может быть определена или непосредственно по их цвету, или по появлению цвета при опрыскивании их определенным реагентом, или по проявлению пятен под действием ультрафиолетовых лучей. Величина сдвига пятна от исходного состояния используется для идентификации компонента, тогда как интенсивность окрашивания пятна является мерой его концентрации.

2. Тонкослойная хроматография

Этот метод аналогичен методу хроматографии на бумаге (см. пункт 1) с тем отличием, что бумага заменяется на тонкий слой адсорбирующего вещества, такого как силикагель, нанесенного на стеклянную или пластиковую пластину. Этот метод более чувствителен, чем хроматография на бумаге.

Дополнительная литература: Fried B. and Sherma J. (1982), *Thin Layer Chromatography Techniques and Application*, Marcel Dekker.

Табл. 11.1. Методы химического анализа

Принцип	Система	Характеристики
Хроматографический	1. Бумага	Простой лабораторный метод разделения молекул
	2. Тонкие слои адсорбента	Более чувствительный, чем предыдущий метод
	3. Жидкость	Лучшие воспроизводимость, разрешение и точность, чем во втором методе, но меньшая чувствительность. Используется для разделения молекул летучих и ионных веществ
	4. Газ	Используется для разделения молекул летучих веществ
Электрохимический	5. Проводимость	Измерение концентрации ионов в электролитах
	6. Гальваническая	Измерение концентрации ионов в электролитах, включая pH
	7. Полярография на постоянном токе	Измерение концентрации ионов
	8. Полярография с очисткой анода	Более чувствительна, чем полярография на постоянном токе, измерение следов металлов
Спектроскопический	9. Спектроскопия по поглощению в ультрафиолетовом и видимом спектре	Очень чувствительный и точный количественный метод
	10. Спектроскопия по поглощению в инфракрасном спектре	Используется для установления структуры и идентификация молекул, а также для проведения количественных анализов
	11. Атомно-эмиссионная спектроскопия	Высокочувствительный метод идентификации металлов с ограниченной чувствительностью к галогенам и неметаллам
	12. Спектроскопия по атомному поглощению	Быстрый количественный анализ исследуемого металла
	13. Флуоресцентная спектроскопия	Высокочувствительный, высокоселективный метод, используется для анализа следов соединений или элементов
Массовый	14. Масс-спектрометрия	Определение ионов по величине отношения их массы к заряду, высокочувствительный, высокоточный метод
Термический	15. Дифференциальный термический анализ	Определение температуры фазовых переходов и реакций, используется для исследования термической стабильности и фазовых диаграмм состояния веществ
	16. Термогравиметрия	Определение изменений массы вещества как функции температуры, используется для исследований термической стабильности и анализа химического состава

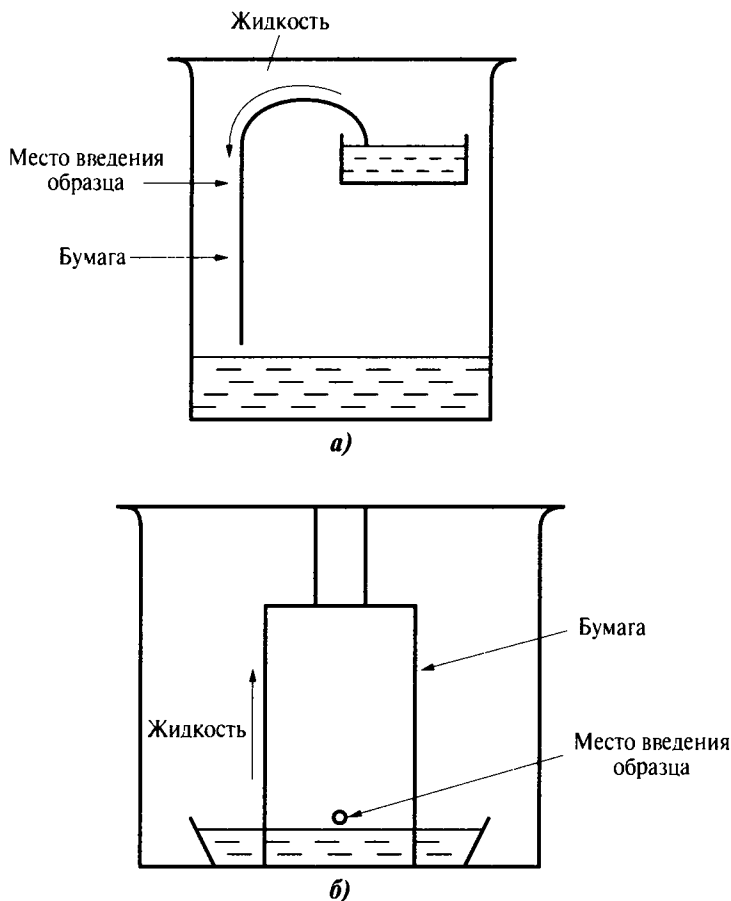


Рис. 11.1. Бумажная хроматография:

а — жидкость спускается по бумаге;

б — жидкость поднимается по бумаге

3. Жидкостная хроматография

Для организации потока жидкости через колонку, заполненную таким материалом, как, например, ионно-обменные смолы, используют насосы (**Рис. 11.2**). Исследуемый образец вводится в колонку у ее основания, время достижения каждым из компонентов исходной смеси верхнего конца колонки фиксируется при помощи детектора. Наиболее используемым детектором является **детектор по поглощению ультрафиолетового излучения**. Имеется три основных вида детекторов:

- детектор с фиксированной длиной волны, когда при помощи фильтров выделяется только несколько определенных длин ультрафиолетовых волн и измеряется их поглощение образцом;
- детектор с изменяемой длиной волны, когда возможен широкий выбор длин волн и поглощение каждой из них сканируется по очереди (это характерно для спектрофотометра);
- детектор с одновременной фиксацией всего спектра длин волн, для чего используется фотодиодная линейка.

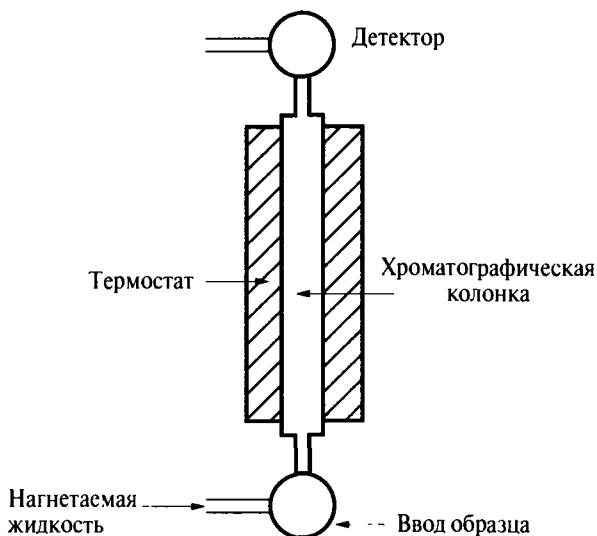


Рис. 11.2. Жидкостная хроматография

Другой тип детектора — **детектор по показателю преломления** — фиксирует разницу значений показателей преломления между подвижной фазой и жидкостью, появляющейся на выходе из колонки. Жидкостная хроматография имеет лучшие воспроизводимость, разрешение и точность, чем тонкослойная хроматография, но обычно менее чувствительна. В отличие от газохроматографического этот метод не ограничен летучестью образца или его термической стабильностью и может быть использован при анализе органических и ионных соединений.

Дополнительная литература: Snyder L.R., Kirkland J.J. (1974), *Introduction to Modern Liquid Chromatography*, Wiley; Willard H.H., Merritt L.L., Dean J.A., Settle F.A. (1988), *Instrumental Methods of Analysis*, Wadsworth.

4. Газовая хроматография

Газовая хроматография — это широко применяемый поточный метод анализа. Тестируемый образец в виде паров или газа вводится в поток газа-носителя, например аргона, гелия или азота, который движется над стационарной фазой (Рис. 11.3). Ограничения метода заключаются в том, что образец должен быть газообразным или летучим настолько, чтобы его можно было испарить без разложения. В **хроматографии с фазами газ — жидкость** стационарной фазой является тонкий слой нелетучей жидкости, покрывающей твердые частицы в колонке (твердые частицы являются лишь подложкой для жидкости). В **хроматографии с фазами газ — твердое вещество** стационарную фазу представляют твердые частицы. Хроматографическая колонка, по которой перемещается подвижная фаза, представляет собой длин-

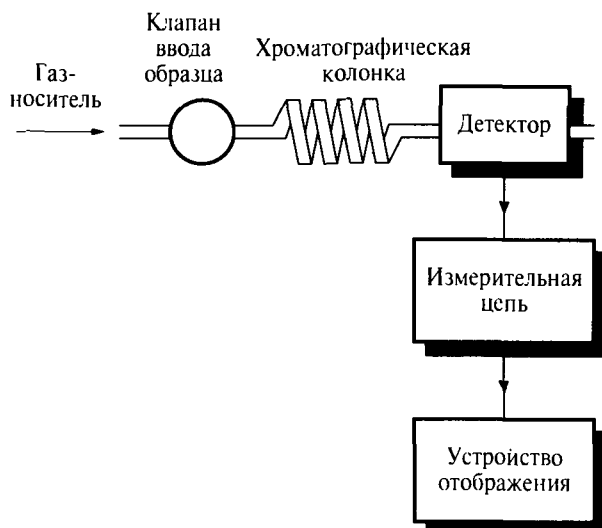


Рис. 11.3. Газовый хроматограф

ную трубку, свернутую в спираль. Скорость, с которой компоненты исследуемого образца движутся по колонке, зависит от их взаимодействия со стационарной фазой: жидкой или твердой.

Газ на выходе из колонки определяется с помощью соответствующего детектора. Хроматограмма представляет собой серию пиков, каждый из которых привязан к определенному моменту времени, соответствующему конкретному компоненту исходного сложного образца. Наиболее широко используемыми детекторами являются **катарометры** (Рис. 11.4) и **пламенно-ионизационные детекторы** (Рис. 11.5).

Принцип действия катарометра основан на изменении теплопроводности газа в зависимости от его состава (см. пункт 2 главы 8). Таким образом, температура и, следовательно, сопротивление

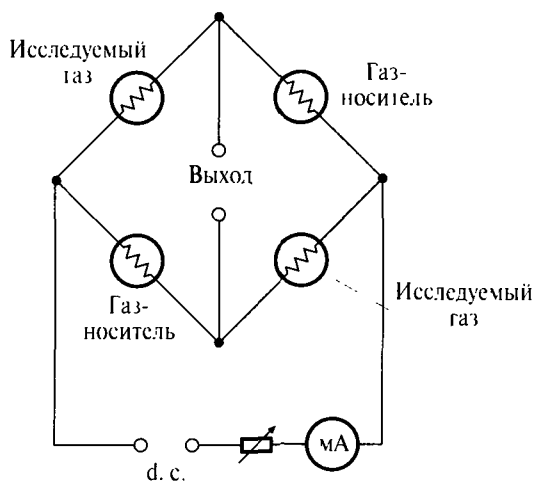


Рис. 11.4. Катарометр

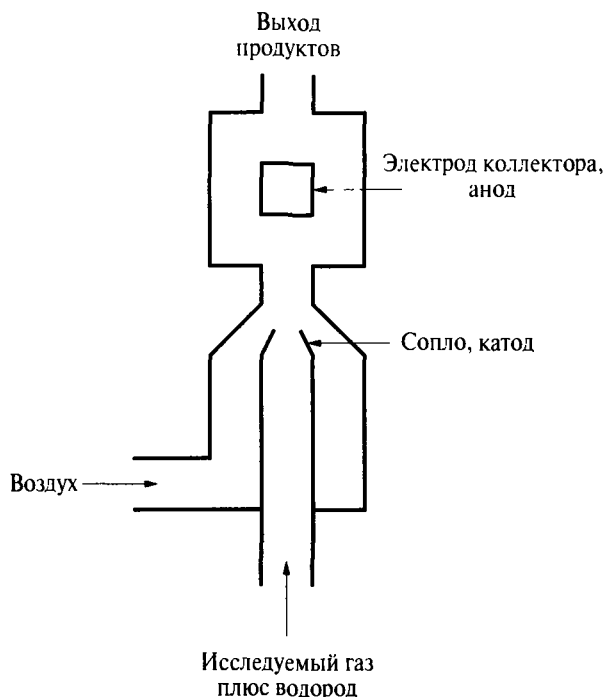


Рис. 11.5. Пламенно-ионизационный детектор

электрически нагретой проволоочки определяются составом газа. Используются четыре таких нагретых проволоочки. Над двумя из них проходит газ-носитель, а над другими двумя — исследуемый газ с выхода колонки. Все четыре проволоочки соединены в мост Уитстона. Изменение сопротивления двух чувствительных элементов моста при прохождении над ними исследуемого газа вызывает разбаланс моста, величина которого зависит от состава газа. Диапазон определяемого с помощью катарометра количества вещества составляет $1 \dots 100000$ нг. Это относится только к ограниченному ряду соединений, а именно к соединениям, содержащим азот или фосфор. При проведении анализа с помощью пламенно-ионизационного детектора газ, вытекающий из колонки, проходит через водородно-кислородное пламя. Это приводит к тому, что молекулы в газе ионизируются и вследствие этого между парой электродов, к которым приложено напряжение, возникает ионизационный ток. Величина тока ионизации, после усиления, будет пропорциональна числу групп $-\text{CH}_2-$ в конкретном компоненте исходной смеси, непосредственно в данный момент проходящем через пламя. Таким образом, для соединений, содержащих эту группу, детектор определяет скорее массу вещества, чем его концентрацию. Диапазон определяемого с помощью пламенно-ионизационного детектора количества вещества составляет $0.01 \dots 10000$ нг. Таким детектором могут быть определены только такие вещества, которые образуют при сгорании заряженные ионы, однако сюда входит большая часть органических соединений.

Дополнительная литература: Notlingk B.E. (ed.) (1985), *Jones Instrument Technology*, vol. 2, *Measurement of Temperature and Chemical Composition* (4th edn), Butterworth; Grob R.L. (1977), *Modern Practice of Gas Chromatography*, Wiley; Willard H.H., Meritt L.L., Dean J.A., Settle F.A. (1988), *Instrumental Methods of Analysis*, Wadsworth.

Электрохимический анализ

5. Электропроводность¹

Проводимость электролитов зависит от наличия ионов в растворе и их концентрации. Для концентраций меньше чем 10^{-4} моль/литр справедливо равенство:

$$\text{Проводимость} = znc(\lambda^0_+ + \lambda^0_-),$$

где z — заряд иона, n — число этих ионов, образованных при диссоциации одной молекулы соли, c — концентрация в единицах моль/литр, λ^0_+ — положительная проводимость при бесконечном разбавлении, λ^0_- — отрицательная проводимость при бесконечном разбавлении раствора. Ионные проводимости зависят от общего количества ионов и температуры. Проводимость обратно пропорциональна сопротивлению и определяется как:

$$\text{Проводимость} = \frac{L}{RA},$$

где L — длина образца, A — площадь поперечного сечения образца и R — его электрическое сопротивление. Единица измерения проводимости — $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$, однако для Ом^{-1} часто используется единица Сименс (См). Длина и площадь измеряются чаще в сантиметрах, а не в метрах, следовательно, единицей проводимости является См/см.

Измерение электропроводности заключается в измерении электрического сопротивления между двумя электродами, погруженными в жидкость с фиксированным расстоянием между ними. Для каждой ячейки величина проводимости зависит от сопротивления R , поэтому можно записать:

$$\text{Проводимость} = \frac{a}{R},$$

где a — постоянная ячейки, которая варьируется в пределах $0.01 \dots 100 \text{ см}^{-1}$. Для определения низких значений проводимости требуется ячейка с низкой константой, ячейка с высокой константой используется для измерения высоких значений проводимости. Ин-

¹ Термин «электропроводность» эквивалентен термину «электрическая проводимость». В тексте п. 5 имеется в виду «электрическая проводимость» (прим. ред.).

тервал постоянных измерительных ячеек должен давать возможность измерять проводимость в диапазоне 0.05...200000 мкСм/см. Постоянная ячейки определяется при измерении сопротивления ячейки, заполненной жидкостью с известной проводимостью, обычно для этого используется стандартный раствор хлорида калия.

Измерение сопротивления ячейки производится или при помощи моста Уитстона, или прямым измерением тока, протекающего через ячейку при определенной разности потенциалов на ней. В обоих случаях используется переменный ток, так как при постоянном токе могут возникнуть проблемы, связанные с поляризацией. В обоих методах необходима температурная компенсация, для чего применяется ряд способов. Например, при работе с мостом Уитстона в плечо моста, соседнее с ячейкой, может быть включен термистор. Изменение сопротивления термистора, обусловленное изменением температуры, гасит влияние температуры на ячейку. Примером этого метода является измерение концентрации диоксида серы в воздухе, здесь измерение проводимости реагента выполняется до и после абсорбции диоксида серы.

Дополнительная литература: Willard H.H., Meritt L.L., Dean J.A., Settle F.A.(1988), *Instrumental Methods of Analysis*, Wadsworth.

6. Гальваническая ячейка

Когда металлический электрод помещен в электролит, положительные ионы покидают металл и переходят в электролит, делая электрод отрицательно заряженным. Возможна также ситуация, когда положительно заряженные ионы металла осаждаются на электроде и таким образом сообщают ему положительный заряд. Величина равновесного потенциала электрода по отношению к раствору зависит от используемого металла и концентрации ионов металла в электролите. Когда в электролит погружаются два электрода, между ними появляется э.д.с., т.е. возникает потенциал на одном электроде относительно другого. Чтобы определить потенциал электрода относительно раствора, необходимо использовать стандартный электрод, имеющий известный потенциал относительно этого раствора. Стандартными электродами, которые наиболее часто используются, являются серебро в хлориде серебра, ртуть в хлористой ртути или каломельный электрод (Рис. 8.21).

Для того чтобы определить концентрацию ионов в электролите, необходимо измерить разность потенциалов, возникающую между ион-селективным и стандартным электродами, для чего используется измерительная цепь с высоким импедансом. Ион-селективные электроды разработаны для многих ионов, например для водорода, натрия, калия, аммония, серебра, меди, свинца, кадмия, хлора, брома, иода и т.д. Измерение концентрации ионов водорода дает величину pH для раствора (см. главу 8).

Дополнительная литература: Noltingk B.E. (ed.) (1985), *Jones' Instrument Technology*, vol. 2, *Measurement of Temperature and Chemical Composition* (4th edn), Butterworth-Heinemann; Bailey P. L. (1976), *Analysis with Ion-selective Electrodes*, Heyden; Willard H.H., Meritt L.L., Dean J.A., Settle F.A. (1988), *Instrumental Methods of Analysis*, Wadsworth.

7. Полярография на постоянном токе

Термин **полярография** используется для определения **вольтамперметрии по постоянному току**, для чего применяется каплющий ртутный электрод. Вольтамперметрия — это измерение тока в зависимости от приложенного напряжения для ячейки, содержащей электролит. На **Рис. 11.6** показана принципиальная схема полярографа. Разность потенциалов прикладывается к двум электродам. Анодом является ртуть в специальной выемке на дне ячейки, катодом — емкость со ртутью, заканчивающаяся капиллярной трубкой, из которой капли ртути падают со скоростью одна капля в три или четыре секунды. Капли проходят через раствор исследуемого вещества. Чтобы вытеснить растворенный кислород из раствора, через него пропускается поток азота. Напряжение на электродах увеличивается с контролируемой скоростью (**Рис. 11.7а**), и при этом отслеживается ток в цепи. Величина тока зависит от вида ионов в растворе исследуемого образца.

Вышеприведенные представления являются базовыми принципами полярографии на постоянном токе. В дальнейшем метод

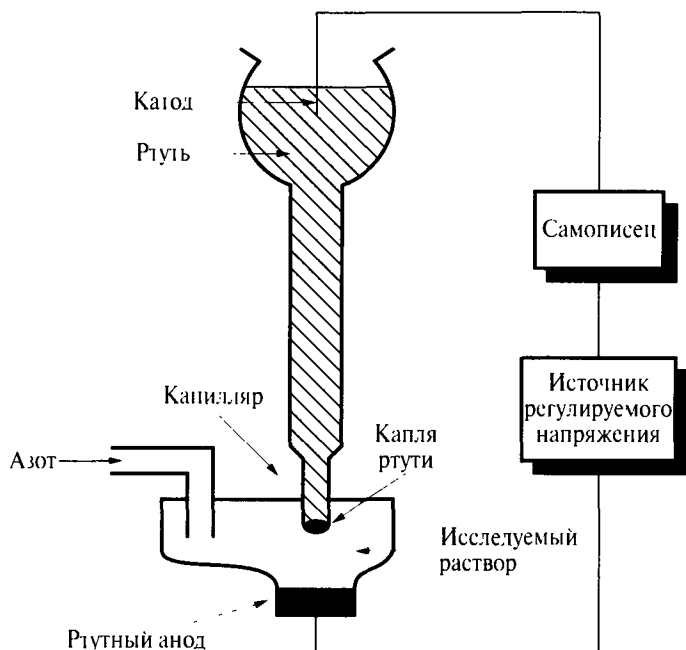


Рис. 11.6. Полярография на постоянном токе

был усовершенствован с целью усилить изменения в выходном токе. Так, при измерении *методом дискретной вольтамперметрии* ток замеряется только в определенное время после образования каждой капли ртути. В методе *нормированной импульсной вольтамперметрии* напряжение между электродами не увеличивается постоянно, а держится на постоянном уровне в течение 60 мс после падения капли, затем резко возрастает на время остальной жизни капли, после чего уменьшается снова, чтобы повторить весь процесс для следующей капли (**Рис. 11.7б**). Импульсы напряжения прямоугольной формы будут повторяться для всех последующих капель, но каждый раз их высота будет увеличиваться. Ток в каждом случае измеряется в течение последних 20 мс существования капли. В методе *дифференциальной импульсной вольтамперметрии* прямоугольные импульсы постоянной величины накладываются на монотонно возрастающее напряжение (**Рис. 11.7в**). Здесь ток измеряется до начала каждого импульса и в его конце, перед самым падением капли. После чего определяется разность этих двух значений тока и строится график ее зависимости от напряжения. Полярография используется для определения



Рис. 11.7. а — линейно возрастающее напряжение;
 б — нормированные импульсы;
 в — дифференциальная импульсная вольтамперметрия

количества висмута, меди, кобальта, никеля, свинца, олова и цинка в легких сплавах и их следов и токсических элементов в пищевых и фармацевтических продуктах.

Дополнительная литература: Heydrovsky J., Zuman P. (1968), *Practical Polarography*, Academic Press; Willard H.H., Meritt L.L., Dean J.A., Settle F.A. (1988), *Instrumental Methods Analysis*, Wadsworth.

8. Вольтамперметрия с анодной очисткой

Вольтамперметрия с анодной очисткой использует те же формы аппаратов, что и полярография. Разность потенциалов прикладывается к электродам в течение интервала времени 5...30 мин. За это время на одном из электродов образуется осадок. Затем процесс реверсируется, производится постепенное увеличение потенциала, чтобы растворить осадок с электрода как на **Рис. 11.7а**, во время этого процесса регистрируется ток как функция напряжения. С помощью вольтамперметрии такие металлы, как висмут, медь, свинец, кадмий и цинк, осаждаются на аноде во время первой стадии процедуры, и, растворяя их осадок при линейном увеличении потенциала на реверсивной стадии процесса, становится возможным проведение количественного анализа их содержания в исследуемом растворе.

Вышеописанная методика является основной. Проведены усовершенствования метода, аналогичные применяемым в полярографии, с использованием дифференциальной импульсной вольтамперметрии. Метод более чувствителен, чем полярография, и может быть использован для анализа растворов с концентрацией меньше чем 10^{-11} М или около 0.1 мкг/л.

Спектроскопия

Спектроскопия — это измерение и идентификация электромагнитного излучения, которое испускается, рассеивается или поглощается атомами, молекулами или другими группами атомов.

9. Спектроскопия поглощения излучения в ультрафиолетовом и видимом спектре

Приборы для детектирования и измерения интенсивности излучения, поглощенного молекулами в ультрафиолетовой и видимой частях спектра, состоят из:

- источника ультрафиолетового или видимого света, испускающего излучение непрерывного диапазона длин волн;
- устройства выбора длины волны излучения, проходящего через образец;
- фотодетектора для определения интенсивности излучения, прошедшего через образец, и передачи сигнала на отображающее устройство.

Источник ультрафиолетового излучения — это обычно водородная или дейтериевая разрядная лампа, для видимого спектра излучения обычно используется лампа накаливания. С помощью фильтров (поглотительных или интерференционных), а также дифракционных решеток и призм может быть произведен выбор определенного узкого диапазона длин волн. В качестве детекторов могут применяться фотодиоды, фотоэмиссионные элементы или фотоумножительные трубки. Так как фотодиоды имеют небольшие размеры, из них может быть построена фотодиодная линейка или двумерная матрица.

В простейшей форме прибора используется один луч (**Рис. 11.8а**). Поглощение определенной длины волны исследуемым образцом сравнивается с ее поглощением эталонным образцом. Например, проводятся два отдельных измерения поглощения излучения в ячейке с образцом в растворителе и в ячейке с чистым растворителем, после чего результаты этих двух измерений сравниваются. В двухлучевом приборе (**Рис. 11.8б**) излучение расщепляется на два луча, один луч проходит через исследуемый образец, другой — через сравнительный эталонный образец. Обычно используется прерывистое излучение с переменной длиной волны. Через образец и эталон проходят световые импульсы, которые, объединяясь на выходе, дают сигнал, по которому можно определить степень поглощения веществом излучения определенных длин волн. Это дает возможность сделать сравнение поглощений при непрерывном изменении длин волн, и, таким образом, на устройстве отображения можно получить зависимость величины поглощения от длины волны, а, значит, и проанализировать состав исследуемого вещества.

Метод исследования поглощения в ультрафиолетовой и видимой областях спектра является высокочувствительным и точным методом количественного анализа, однако он не так полезен, как другие спектроскопические методы, для идентификации соединений.

Дополнительная литература: Willard H.H., Meritt L.L., Dean J.A. and Settle F.A. (1988), *Instrumental Methods of Analysis*, Wadsworth.

10. Инфракрасная спектроскопия

Инфракрасная спектроскопия поглощения дает информацию об изгибных, вращательных и колебательных движениях атомов в молекулах и используется для того, чтобы определить структуру и идентифицировать органические и неорганические соединения посредством идентификации характеристик абсорбционных спектров функциональных групп в молекулах. Метод используется для идентификации и количественного анализа.

Имеются два типа приборов с частотным разделением и без него. Приборы первого типа имеют устройство для выбора длин волн — призму или дифракционную решетку для частотного разложения излучения. Приборы этого типа аналогичны спектрофотометрам ультрафиолетового и видимого спектра с двойным лучом, как на **Рис. 11.86**. В приборах без разложения частот для выделения узкой полосы длин волн обычно используются фильтры, что необходимо для исследования узкой конкретной области волн без сканирования всего спектра поглощения. На **Рис. 11.9** показана блок-схема устройства таких приборов. Излучение от источника расщепляется на две части, одна проходит через исследуемый образец, другая — через сравнительный эталонный образец. Два луча затем комбинируются при помощи прерывателя так, что на выходе происходит чередование сигналов от образца и эталона. После этого сигнал пропускается через фильтр, чтобы выделить диапазон длин волн, который будет фиксироваться детектором, информация с которого поступает на устройство отображения. Такие приборы используются для серийных исследований известных веществ.

Для исследования разных частей инфракрасного спектра требуются различные источники излучения, оптические системы и детекторы. Так, для приборов с рассеянием инфракрасного излучения в диапазоне 0.8...2.5 мкм, источником излучения является вольфрамовая нить лампы накаливания. Для оптической системы используется кварцевая призма или отражающая дифракционная решетка. В качестве детектора применяется фоторезистор. Для средней области инфракрасного излучения диапазона 2.5...50 мкм источником может служить или нить накала Нернста (прут, изготовленный из сплавленной смеси оксидов), или нить накала Глобара (прут из карбида кремния), или раскаленная спираль из нихромовой проволоки. В качестве оптической системы часто используется набор дифракционных решеток либо с кварцевой призмой, либо с фильтром. Детектором является термобатарея, пирокристалл (такой кристалл имеет поверхностный заряд, величина которого зависит от температуры) или термистор. Для инфракрасной области в диапазоне 50...1000 мкм в качестве источника излучения используется ртутно-дуговая лампа высокого давления, отражательная дифракционная решетка применяется для работы в нижней части спектра и интерферометр — в верхней части спектра, а детектором является пневматический детектор Голея (здесь излучение вызывает рост давления в ячейке, что, в свою очередь, приводит к деформации диафрагмы) или пироэлектрический кристалл.

Дополнительная литература: Willard H.H., Meritt L.L., Dean J.A. and Settle F.A. (1988), *Instrumental Methods of Analysis*, Wadsworth.

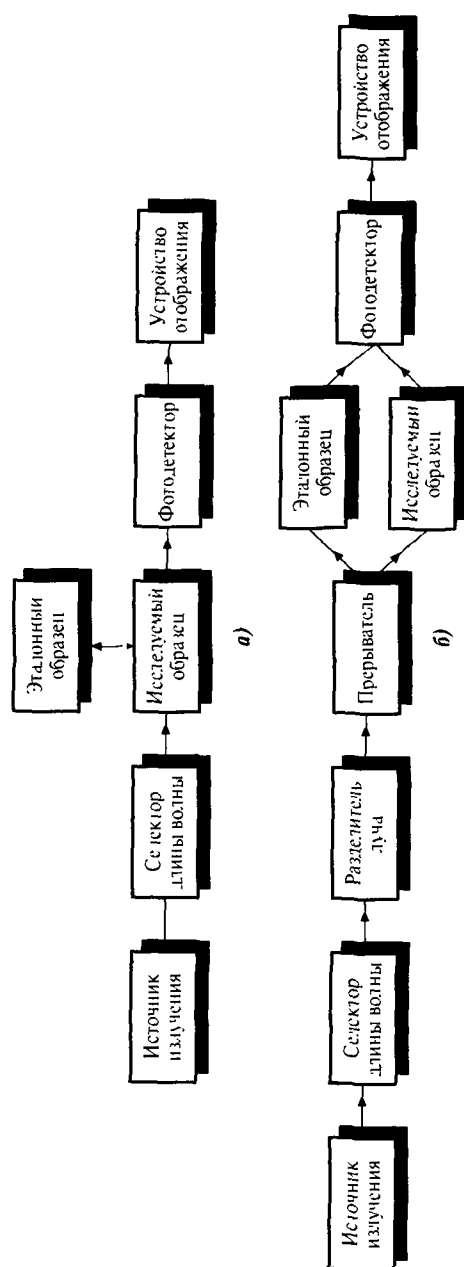


Рис. 11.8. Схемы спектрофотометров: а — однолучевой метод; б — метод двойного луча

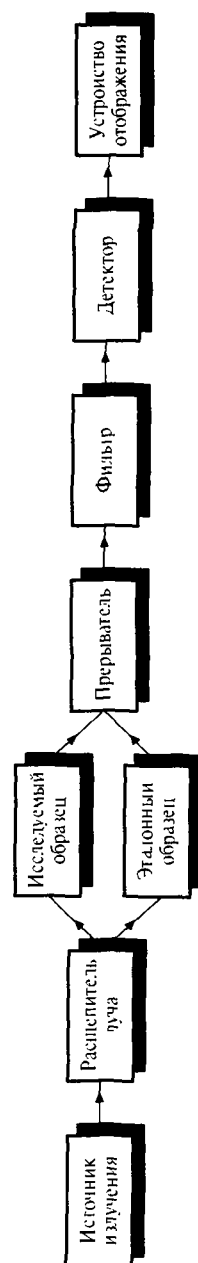


Рис. 11.9. Схема инфракрасного спектрометра с фильтром

11. Атомная эмиссионная спектроскопия

Атомная эмиссионная спектроскопия имеет дело с излучением, испускаемым возбужденными электронами, входящими в состав атомов. Величины испускаемых длин волн являются характеристикой атомов определенных элементов и играет такую же роль, как отпечатки пальцев при их идентификации. Это очень чувствительный метод идентификации всех металлических элементов с ограниченной чувствительностью к галогенам и другим неметаллам.

При сжигании образца в пламени он распадается на отдельные атомы, находящиеся в возбужденном состоянии. По этой причине на этот метод часто ссылаются как на **пламенно-эмиссионную спектроскопию**. Исследуемый образец в растворенном виде вводится в высокоскоростной газовый поток, где распыляется в тонкий аэрозоль. Получающаяся тонкая смесь соединяется затем со смесью окислителя и топлива и сжигается в горелке. Излучение расщепляется на составляющие его длины волн с помощью призмы или дифракционной решетки, и характерные длины волн детектируются фотодетектором. Выходной сигнал выводится на устройство отображения или регистрируется на фотографическую пластинку (**Рис. 11.10**).

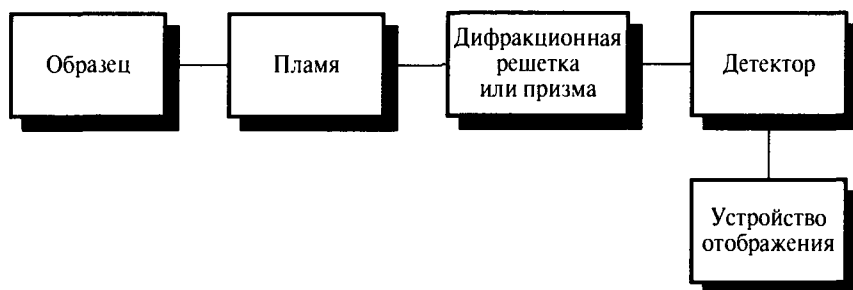


Рис. 11.10. Схема атомно-эмиссионного спектрометра

Дополнительная литература: Willard H.H., Meritt L.L., Dean J.A. and Settle F.A. (1988), *Instrumental Methods of Analysis*, Wadsworth.

12. Атомно-абсорбционная спектроскопия

Атомно-абсорбционная спектроскопия используется для количественного анализа элементов в образце. Излучение на первой резонансной линии (переход с нижнего на первый возбужденный уровень) от вакуумной лампы с полым катодом пропускается через образец в атомизированном состоянии, которое возникает при сжигании образца в пламени. Далее используется монохроматор, часто обычная дифракционная решетка, для вы-

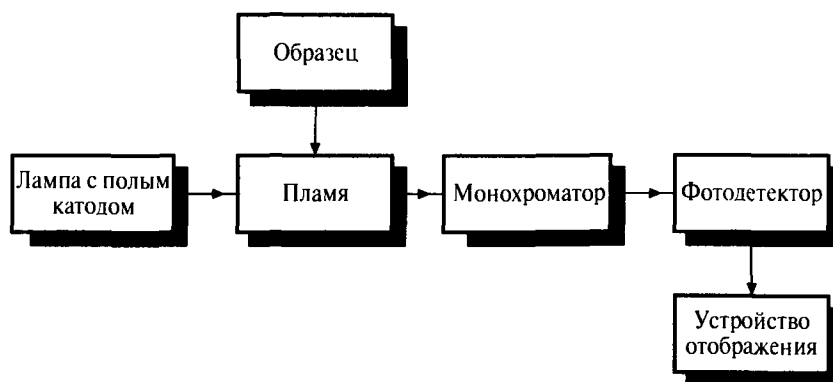


Рис. 11.11. Схема атомно-абсорбционного спектрофотометра

деления именно той части спектра, которая появилась в образце на первой резонансной линии. Интенсивность длины волны измеряется фотодетектором и выводится на дисплей (**Рис. 11.11**). Метод дает быстрый и надежный анализ исследуемого образца, обычно металла.

Дополнительная литература: Willard H.H., Meritt L.L., Dean J.A. and Settle F.A. (1988), *Instrumental Methods of Analysis*, Wadsworth.

13. Флуоресцентная спектроскопия

Излучение, попавшее на молекулу или атом, поглощается ими и может перевести их в возбужденное состояние. Когда возбужденные атомы или молекулы возвращаются в устойчивое состояние, возникает флуоресценция, при этом испускается идентичное излучение или отличное от него. Обычно **флуорометр** состоит из источника излучения (часто это ксеноновая лампа постоянного тока и высокого давления или ртутная лампа низкого давления), фильтра или дифракционной решетки для выделения определенной длины волны этого излучения, которая затем направляется на ячейку, содержащую образец. Результирующая флуоресценция обычно детектируется в направлении 90° к исходному излучению после прохождения ее через еще один фильтр или монохроматор (**Рис. 11.12**). Для получения флуоресценции образец предварительно сжигается в пламени, что необходимо для того, чтобы он распался на отдельные атомы. Флуоресцентная спектроскопия — это высокочувствительный метод количественного определения соединений или элементов с высокой разрешающей способностью.

Дополнительная литература: Willard H.H., Meritt L.L., Dean J.A. and Settle F.A. (1988), *Instrumental Methods of Analysis*.

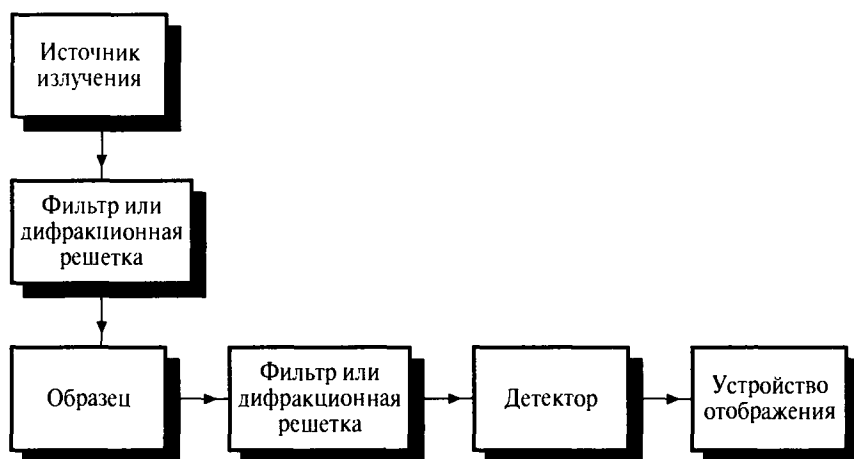


Рис. 11.12. Схема флуорометра

Масс-спектрометрия

14. Масс-спектрометрия

Масс-спектрометрия сортирует исходные виды молекул и их фрагменты-ионы в соответствии с величиной отношения массы к заряду, и, таким образом, появляется возможность их идентифицировать и количественно определять. Это очень чувствительный метод с высокой точностью.

Есть много различных типов масс-спектрометров. В общем виде такой прибор состоит из:

- устройства ввода, при помощи которого образец может быть введен в прибор, давление в котором равно 10^{-5} Па;
- устройства для ионизации образца;
- масс-анализатора, в котором используются электромагнитные поля для разделения ионов в соответствии с отношением масса/заряд,
- системы улавливания ионов, в которой происходит регистрация ионов в соответствии с их отношением масса/заряд (Рис. 11.13).

Устройство ввода для жидкостей представляет собой шприц (аналогичный используемому для подкожных инъекций) для впрыскивания исследуемого раствора через резиновую перегородку в камеру низкого давления, где жидкость испаряется и затем напускается через маленькое отверстие в ионизационную ка-



Рис. 11.13. Схема масс-спектрометра

меру. Твердые вещества можно вводить в это устройство на зонде, испаряя их нагревом. Ионизация может проводиться при помощи бомбардировки испаренного образца электронами из электронной пушки. Полученные положительные ионы ускоряются в камере направленным электрическим полем. Имеется ряд разновидностей масс-анализаторов. Один из них включает два компонента, первый — это электрическое поле, направленное под прямым углом по отношению к потоку ионов для разделения ионов по уровню кинетической энергии, и затем магнитное поле для разделения ионов по их отношению масса/заряд. На **Рис. 11.14** показана схема такого устройства. Наиболее часто используемой системой для улавливания ионов является электронный умножитель, в котором ионы, ударяясь о металлическую пластину, вызывают эмиссию ее электронов, которые затем притягиваются вторым электродом, откуда эмитируется очередная усиленная порция электронов, которые, в свою очередь, затем попадают на третий электрод и т.д. В системе может быть до 15...18 электродов. Таким образом, число электронов на каждом электроде будет умножаться. При изменении магнитного поля могут быть продетектированы ионы с различными значениями отношений масса/заряд. Альтернативным способом детектирования ионов является получение полного спектра масс на фотографической пластинке.

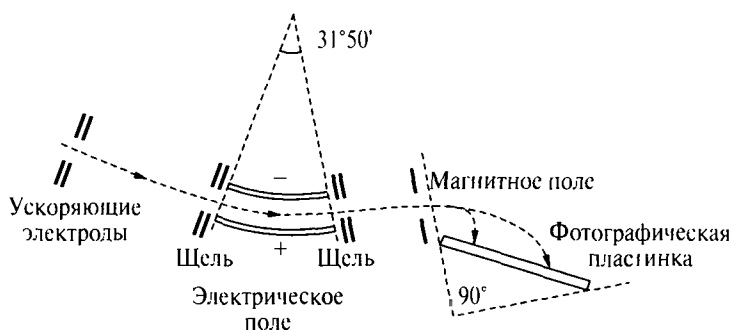


Рис. 11.14. Масс-спектрометр по схеме Матхауса—Герцога

Дополнительная литература: Willard H.H., Meritt L.L., Dean J.A. and Settle F.A. (1988), *Instrumental Methods of Analysis*, Wadsworth.

Методы термического анализа

Эти методы включают в себя нагрев или охлаждение образца и измерение при этом некоторых физических свойств материалов в виде зависимостей от температуры.

Дополнительная литература: Wendlandt W.W. (1986), *Thermal Methods of Analysis*, Wiley; Daniels T. (1973), *Thermal Analysis*, Kogan Page.

15. Дифференциальный термический анализ

Дифференциальный термический анализ (ДТА) включает в себя нагрев образца и термически инертного эталонного материала в двух отдельных ячейках в общем нагревательном блоке при одной и той же скорости. При этом регистрируется разница температур в них при помощи дифференциальной термопары, один спай которой вставлен в образец, другой — в эталон (Рис. 11.15).

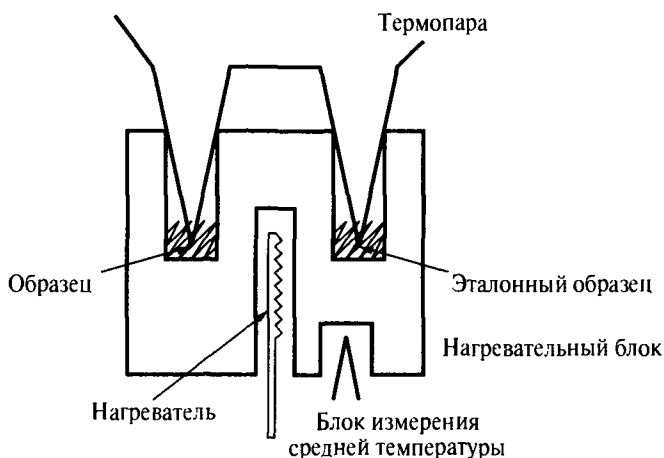


Рис. 11.15. Дифференциальный термический анализ

Кроме того, фиксируется температура нагрева блока. Когда в образце происходит какое-либо химическое или физическое изменение, оно сопровождается выделением или поглощением тепла и изменением температуры образца относительно эталона. Такие изменения отображает график разности температур между образцом и эталоном от средней температуры. Метод используется для определения термической стабильности материалов и построения фазовых диаграмм состояния вещества.

16. Термогравиметрический анализ

Термогравиметрический анализ (ТГА) включает нагрев образца с контролируемой скоростью в инертной или реакционной атмосфере и непрерывную при этом регистрацию его веса. Изменения в весе происходят в результате испарения продукта или химических реакций, протекающих при нагреве. В результате может быть построен график зависимости веса образца от температуры. Метод применяется для определения термической стабильности материалов и анализа сложных смесей веществ.

12. ПЛОТНОСТЬ

Плотность определяется как масса на единицу объема. Относительная плотность — отношение массы объема к массе эквивалентного объема воды, обычно при температуре 4°C. В Табл. 12.1 перечисляются методы, описанные в этой главе, для измерения плотности и их характеристики.

Табл. 12.1. Системы измерения плотности

Принцип	Система	Характеристики
Весовой	1. Баланс сил	Непрерывный, может использоваться с суспензиями, плотность измеряемых жидкостей до 1600 кг/м ³
Плавучесть тела	2. Динамометрический элемент	Непрерывный
	3. Ареометр	Простой, дешевый
	4. Торсионная трубка	Может быть использован для жидкостей при высокой температуре, в открытых и герметично закрытых емкостях
По давлению	5. Перепад давлений	Может быть использован для агрессивных жидкостей
	6. Пузырьковая	Непригоден для закрытых сосудов и жидкостей, содержащих твердые частицы
Вибрационный	7. Вибрирующая труба	Высокая точность, диапазон измерений до 3000 кг/м ³ , для жидкостей и смесей типа жидкость — твердые частицы
	8. Вибрирующий цилиндр	Для газов до 400 кг/м ³
По излучению	9. Гамма-излучение	Небольшой диапазон измерений 30...100 кг/м ³

Весовые методы

1. Системы баланса сил

Эти системы могут быть использованы для непрерывного измерения плотности движущихся жидкостей. На Рис. 12.1 показана принципиальная схема такой системы. Жидкость движется через горизонтальную U-образную трубу, которая имеет гибкие соединения, так что она может поворачиваться относительно этого соединения. Вес жидкости в этой трубе создает силу, действующую на опору. В пневматической системе эта сила приводит к изменению давления при помощи регулируемого сопла. Изменение давления, в свою очередь, вызывает компенсирующее изменение поддерживающей силы, которая действует на опору трубы через сильфонный механизм. В результате этого при наступлении баланса сил, т.е. когда U-образная труба находится в горизонтальном положении, величина давления в систе-

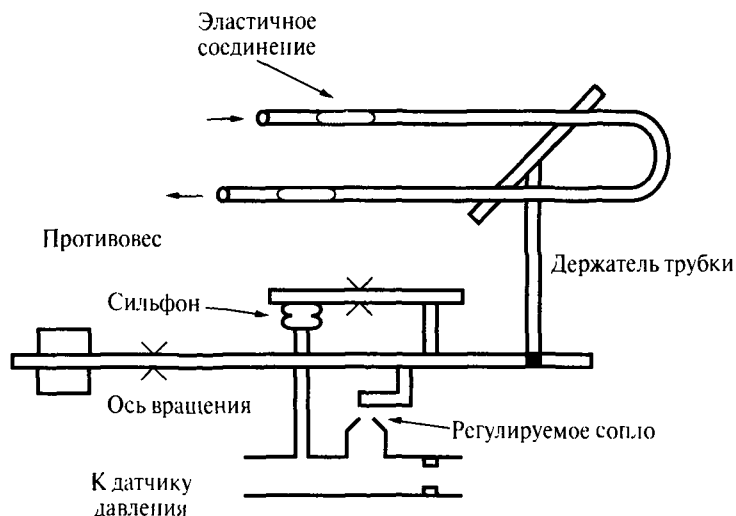


Рис. 12.1. Система баланса сил для измерения плотности

ме будет являться мерой веса жидкости в ней. Так как объем U-образной трубы постоянный, давление в системе является также и мерой плотности жидкости. Система используется для определения величины плотности до 1600 кг/м^3 для суспензий и жидкостей, содержащих твердые частицы. Необходимо, чтобы в системе была достаточно высокая скорость потока, для того чтобы избежать осаждения твердых веществ.

2. Динамометрический элемент

Если уровень жидкости в емкости поддерживается постоянный, то любое изменение ее веса происходит за счет изменения ее плотности. Динамометрические элементы (см. пункт 21 главы 8, а также использование динамометрического элемента в главе 17) в опоре емкости могут быть использованы для непрерывного определения изменений веса, а, следовательно, и плотности.

Методы плавучести

На тело, погруженное или частично погруженное в жидкость, действует выталкивающая сила, равная весу жидкости, вытесненной телом (закон Архимеда).

3. Ареометры

Простой ареометр (**Рис. 12.2**) — это, в сущности, взвешенная трубка, которая плавает в жидкости, погружаясь на глубину, зависящую от плотности этой жидкости. Вес ареометра в этом случае будет равен весу жидкости, вытесненной им. Шкала на узкой части прибора дает возможность считывать величину плотности по цифре, соответствующей уровню поверхности жидкости. Инструмент прост и дешев.

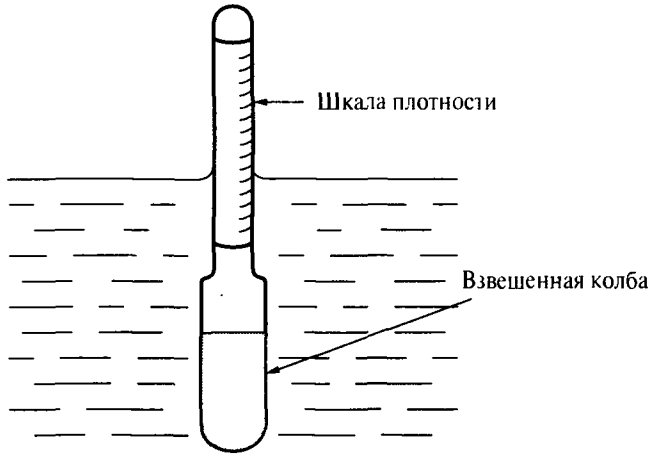


Рис. 12.2. *Ареометр*

4. Торсионная трубка

Торсионная трубка (см. главу 17 и **Рис. 17.9**) может быть использована для измерения плотности. В этом устройстве поплавок полностью погружен, и поэтому объем вытесненной жидкости не меняется. Изменяется только выталкивающая сила при изменении плотности жидкости. Выталкивающая сила, в свою очередь, через рычаг закручивает трубку. Этот эффект можно измерять при помощи тензодатчиков деформации или пневматическим устройством. Такой метод можно применять при высокой температуре жидкости как в открытых, так и закрытых емкостях.

Методы по измерению давления

Разница давлений между двумя уровнями в жидкости или газе равна $h\rho g$, где h — это расстояние между уровнями по вертикали, ρ — плотность жидкости, g — ускорение земного притяжения.

5. Методы по перепаду давления

На **Рис. 12.3** показаны три варианта методов, которые могут быть использованы для измерения плотности жидкости. На **Рис. 12.3а** уровень жидкости в емкости поддерживается постоянный. Таким образом, давление на некотором уровне ниже поверхности зависит только от плотности жидкости. На **Рис. 12.3б** перепад давления измеряется между двумя различными уровнями жидкости, который будет прямо пропорциональный плотности жидкости. Такой метод известен как метод «с мокрой трубой». Этот метод обычно использует разделительную жидкость в «мокрой трубе», которая имеет большую плотность, чем рабочая жидкость, и не смешивается с ней. В тех случаях, когда раз-

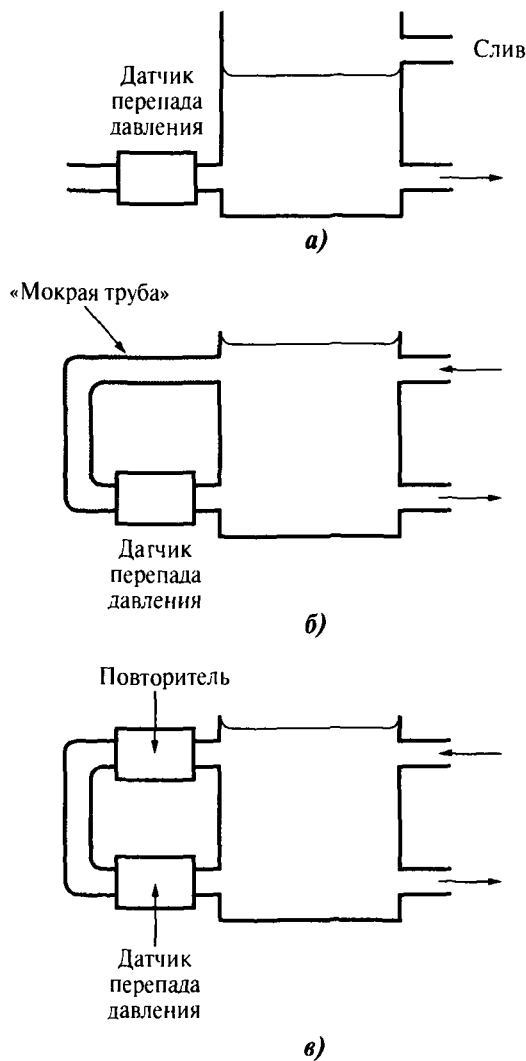


Рис. 12.3. Методы измерения плотности по перепаду давления

делительную жидкость использовать нельзя, может применяться повторитель давления (**Рис. 12.3в**). Повторитель воспроизводит давление в точке верхнего уровня и позволяет измерительному устройству контролировать перепад давления между двумя уровнями.

6. Пузырьковый метод

Пузырьковый метод (см. в главе 17 использование этого метода для измерения уровня) основан на том принципе, что давление в трубке, открытый конец которой погружен в жидкость, при подаче в нее газа ограничивается вытекающим газом в виде пузырьков. На **Рис. 12.4** показано устройство, состоящее из двух трубок, которые подключены к одному и тому же источнику газа. Открытые концы трубок размещены на разной глубине в

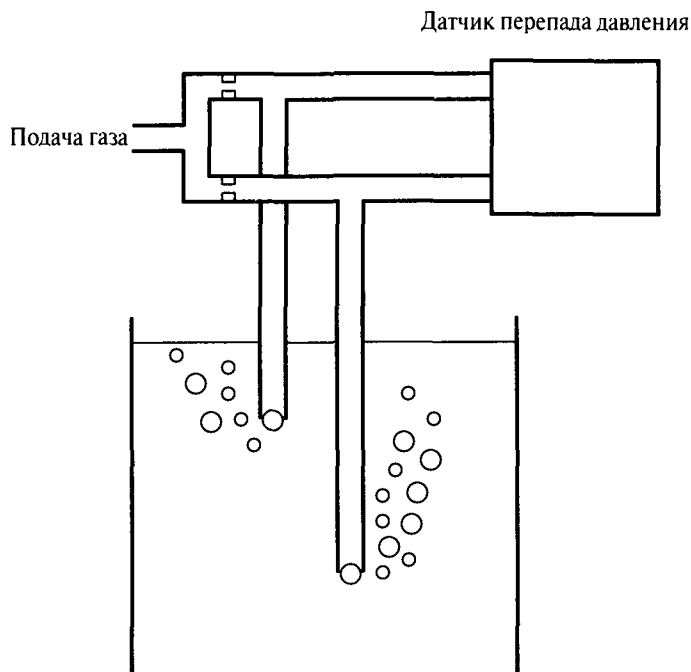


Рис. 12.4. Пузырьковый метод

жидкости, и это создает перепад давления между двумя трубками. При постоянной разнице высот между трубками перепад давления будет связан с плотностью жидкости. Следовательно, измерение величины перепада давления является здесь мерой плотности жидкости. Такой метод не подходит для закрытых сосудов или жидкостей, содержащих твердые частицы, которые могут блокировать трубки. Данный метод может применяться для агрессивных жидкостей, только если трубки, погруженные в жидкость, будут защищены соответствующим образом.

Вибрационные методы

Частота, с которой проволока или труба, закрепленные на обоих концах, будут свободно колебаться, зависит от длины между зажимами, массы на единицу длины и натяжения или жесткости (см. пункты 30 и 31 главы 8).

7. Вибрирующая труба

На **Рис. 12.5** показана принципиальная схема метода вибрирующей трубы для измерения плотности жидкости, протекающей по этой трубе. На каждом конце трубы имеются тяжелые массы, которые плотно прикреплены к концам. Труба приводится в колебательное движение при помощи магнитных сил, вызываемых катушкой возбуждения, при протекании через нее переменного электрического тока. Катушка размещается в средней



Рис. 12.5. Метод вибрирующей трубы

точке длины трубы между зажимами. Амплитуда колебаний трубы в средней точке воспринимается приемной катушкой. Выходной сигнал этой катушки используется как сигнал обратной связи через усилитель, питающий возбуждающую катушку. В результате происходит возбуждение и поддержание колебаний трубы на ее собственной частоте. Частота зависит от полной массы трубы и ее содержимого. Так как труба имеет постоянный объем, частота изменяется в зависимости от плотности жидкости в трубе. Связь между частотой f и плотностью ρ может быть записана в виде:

$$\rho = \frac{A}{f^2} + \frac{B}{f} + C,$$

где A , B , C — постоянные величины для конкретной трубы. Этот метод может применяться для жидкостей и смесей жидкость—твердые частицы при значениях плотностей до 3000 кг/м^3 , с высокой точностью (около $\pm 0.2\%$).

8. Вибрирующий цилиндр

Для измерения плотности газов в них погружают тонкостенный цилиндр. Цилиндр зажимается на одном конце, и в нем возбуждаются колебания при помощи электромагнитной возбуждающей катушки, а амплитуда воспринимается при помощи приемной катушки. Выходной сигнал последней используется как обратная связь через усилитель, питающий катушку возбуждения. Таким образом, поддерживаются колебания на собственной частоте цилиндра. Не только цилиндр участвует в колебательном движении, но и газ, контактирующий с цилиндром. Плотность этого газа действует как эффективная присоединенная масса на единицу длины цилиндра и таким образом оказывает влияние на частоту его собственных колебаний. Соотношение между частотой и плотностью газа ρ можно записать в виде:

$$\rho = 2d_0 \left(\frac{f_0 - f}{f} \right) \left[1 + \frac{K}{2} \left(\frac{f_0 - f}{f} \right) \right],$$

где f — частота для газа с плотностью ρ , f_0 — частота в вакууме, d_0 и K — постоянные величины для конкретной трубы. Этот метод применяется для измерения плотности до 400 кг/м^3 .

Радиационные методы

Прохождение гамма-излучения через материал можно выразить экспоненциальной зависимостью в виде:

$$I_t = I_i e^{-\mu \rho x},$$

где I_i — интенсивность падающего излучения, I_t — интенсивность излучения после прохождения через слой материала толщиной x , плотностью ρ и коэффициентом массового поглощения μ . Коэффициент массового поглощения зависит от мощности гамма-излучения и абсорбционных свойств материала.

9. Датчик измерения плотности по гамма-излучению

Для конкретного источника гамма-излучения при прохождении гамма-лучей через поглощающий материал постоянной толщины доля прошедшего излучения зависит от плотности этого материала. При этом происходит и значительное изменение значения массового коэффициента поглощения. Обычно такой датчик измерения плотности состоит из источника излучения на одной стороне сосуда, содержащего исследуемое вещество, и ионизационного детектора (см. главу 19) на другой стороне. Величина выходного сигнала ионизационного детектора зависит от плотности вещества в сосуде. Так как датчик измеряет полную плотность на пути излучения, могут появиться проблемы, связанные с твердыми включениями или пузырьками газов, попавшими в луч между источником излучения и детектором. Для обычных источников излучения оптимальное расстояние между источником и детектором должно составлять порядка 0.3 м . Диапазон измерений таких приборов узкий и обычно лежит в интервале $30 \dots 100 \text{ кг/м}^3$.

13. ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

В этой главе описываются измерения линейных и угловых перемещений. Измерения небольших перемещений, являющихся частью измерений деформаций, включены в главу 20. Термин **компаратор** используется для обозначения инструментов, применяемых в инженерной практике для сравнения длины исследуемого образца с длиной стандарта. В Табл. 13.1 приведен список описанных в этой главе методов и их основные характеристики.

Механические измерения линейных перемещений

Дополнительная литература: Brooker K. (1984), *Manual of British Standards in Engineering Metrology*, Hutchinson.

1. Стальная линейка

Инженерная стальная измерительная линейка позволяет измерять длину до 1000 мм с точностью $\pm 0.1 \dots 0.3$ мм. Более низкая точность характерна для измерения более длинной линейкой.

2. Винтовой микрометр

Наружный микрометр (Рис. 13.1) можно использовать для измерения небольших длин. Его точность определяется точностью изготовления резьбы, используемой в микрометре для обеспечения движения регулируемого наконечника. Современные образцы могут иметь электрический датчик для преобразования движения винта в цифровую информацию на дисплее. Диапазон измерения таких приборов лежит в пределах $0 \dots 600$ мм, и они имеют точность около ± 0.002 мм. Винтовые микрометры не приспособлены для непрерывных измерений.

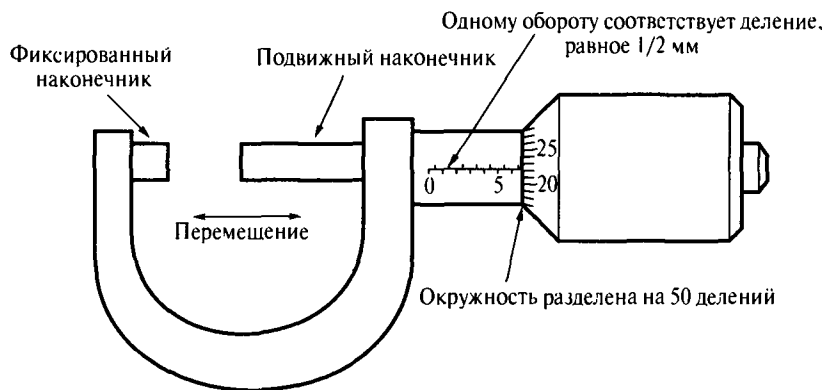


Рис. 13.1. Винтовой микрометр

Табл. 13.1. Методы измерений перемещений

Принцип	Система	Характеристики
Линейное перемещение Механический	1. Стальная линейка	Диапазон измерений 0...1000 мм, точность $\pm 0.1...0.3$ мм
	2. Микрометр	Диапазон измерений 0...600 мм, точность ± 0.002 мм
	3. Штангенциркуль	Диапазон измерений 0...1000 мм, точность $\pm 0.02...0.06$ мм
	4. Микрометр с круговой шкалой (индикатор)	Точность $\pm 0.1...0.3$ мм, используется для измерения малых перемещений, выходной сигнал — перемещение указателя по шкале
	5. Сигма-компаратор	Выходной сигнал — перемещение указателя по шкале
	6. Компаратор Джоуаисона	Выходной сигнал — перемещение указателя по шкале
Пневматический	7. Воздушный датчик	Величина смещения поплавка ротаметра — мера перемещения, могут использоваться разные насадки датчика для расширения диапазона измерений
Электрический	8. Конденсатор	Высокий импеданс, хорошее разрешение, точность $\pm 0.01\%$
	9. Переменное магнитное сопротивление	Короткий диапазон измерений 0...10 мм, плохая линейность, точность $\pm 0.5\%$
	10. Линейно изменяемый дифференциальный трансформатор	Диапазон измерений 0...2 мкм или 0...500 мм, хорошая линейность, точность $\pm 0.5\%$
	11. Индуктосин	Используется для автоматического контроля, точность ± 2.5 мкм
Оптический	12. Позиционно-чувствительный фотозлемент	Диапазон измерений только несколько мм, дискретность около 1 мкм, хорошая стабильность
	13. Муаровые полосы	Используется для автоматического контроля, надежный, разрешение около 1 мкм
	14. Интерферометр	Высокая точность, диапазон измерений до 2 м
	15. Время пролета	Для измерений больших расстояний
Угловое перемещение Электрический	16. Потенциометр	Угловое перемещение 1 или нескольких оборотов, точность $\pm 1...0.002\%$
	17. Синус-косинусный вращающийся трансформатор	Измеряет угловые перемещения оси, разрешение 0.4°
	18. Сельсин	Может использоваться для измерения углового перемещения или работает в паре для передачи углового перемещения на расстояние
Положение оси	19. Дискретный датчик	Измеряет относительное угловое перемещение, разрешение обычно $6...0.3^\circ$
	20. Цифровой датчик	Измеряет абсолютное угловое перемещение, разрешение обычно $0.4...0.6^\circ$
Оптический	21. Автоколлиматор	Измеряет малые угловые перемещения, разрешение 0.5 с
	22. Зеркально-линзовый угломер	Измеряет малые угловые перемещения, разрешение 0.2 мин.

3. Нониусные штангенциркули

Нониусные штангенциркули (Рис. 13.2) в сущности те же стальные линейки с губками для охвата объекта с разных сторон по месту измерения. Они имеют диапазон измерения в пределах 0...1000 мм и обеспечивают точность $\pm 0.02 \dots 0.06$ мм.

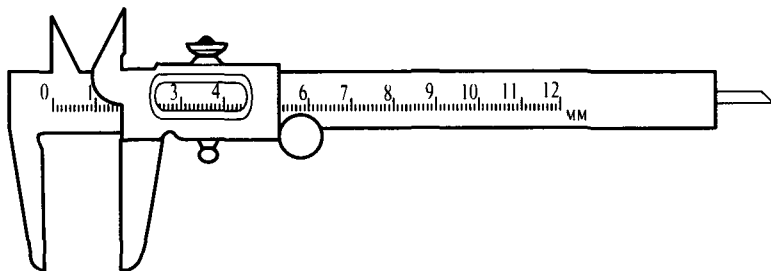


Рис. 13.2. Нониусный штангенциркуль

4. Микрометр с круговой шкалой (индикатор)

Микрометр с круговой шкалой (Рис. 13.3) использует систему шестеренок для преобразования линейного перемещения его плунжера в существенно усиленное вращение стрелочного указателя по шкале. При шкале с делениями 0.01 мм они могут показывать малые изменения порядка ± 0.025 мм с погрешностью 0.003 мм. Их точность лежит в пределах $\pm 0.005 \dots 0.020$ мм. Наибольшее значение соответствует большим перемещениям при многих оборотах стрелки вокруг шкалы.

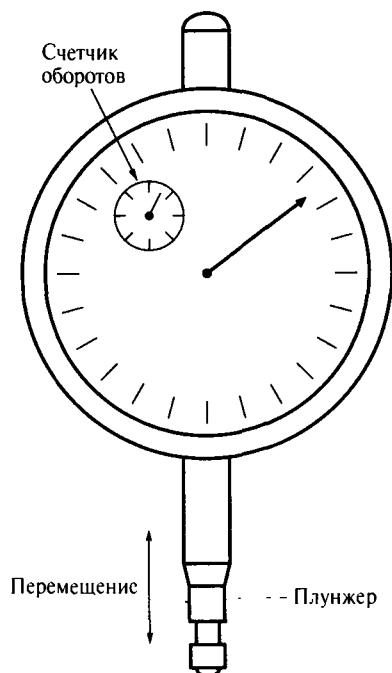


Рис. 13.3. Микрометр с круговой шкалой

5. Сигма-компаратор

Сигма-компаратор (Рис. 13.4) использует комбинированные рычаги, чтобы получить большие усиления. Усиление первого рычага составляет y/x , а второго — R/r . Следовательно, полное усиление равно yR/xr . Может быть достигнуто усиление порядка 300...500 раз.

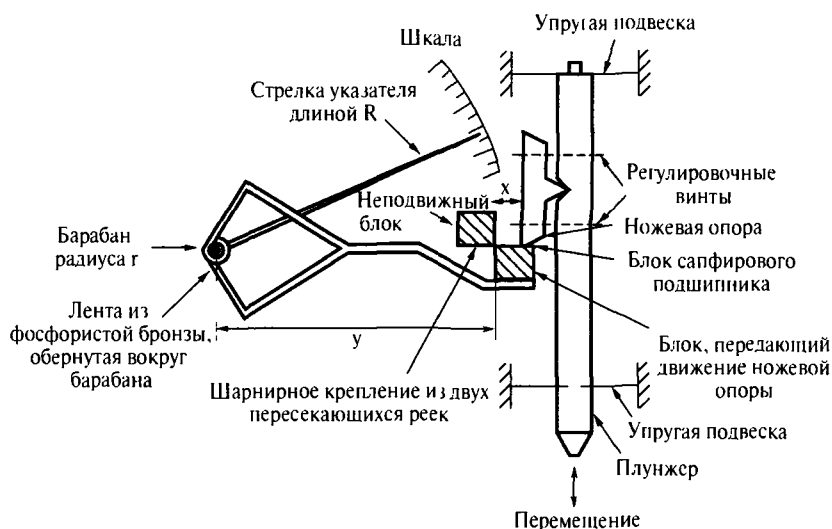


Рис. 13.4. Сигма-компаратор

6. Компаратор Джохансона

Компаратор Джохансона (Рис. 13.5) использует закрученную металлическую ленту, чтобы преобразовать движение плунжера в усиленное вращение стрелочного указателя по шкале. Возможно усиление до 5000 раз.

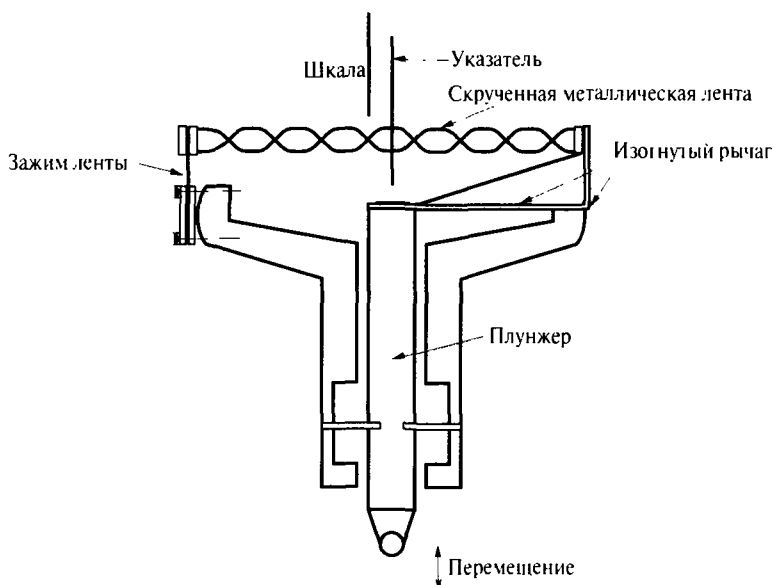


Рис. 13.5. Компаратор Джохансона

Пневматические измерения линейных перемещений

7. Воздушный датчик

Воздушный датчик, или пневматический компаратор, работает на том принципе, что если струя воздуха течет в узком зазоре с поверхностью, то расход воздуха в струе зависит от величины этого зазора. Расход можно измерять, используя датчик расхода типа ротаметра (см. главу 15). На **Рис. 13.6а** показана разновидность такого датчика, который может использоваться для измерения линейных перемещений. На **Рис. 13.6б** представлен датчик для измерения диаметра отверстий. На **Рис. 13.6в** — для измерения конусности отверстий. На **Рис. 13.6г** — для измере-

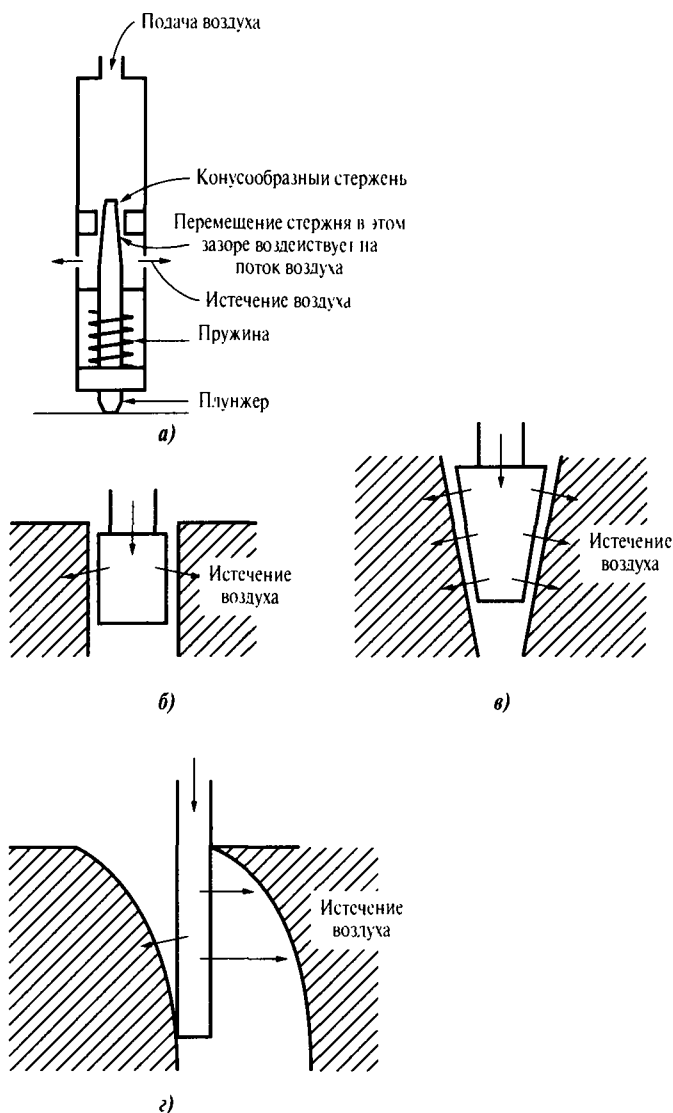


Рис. 13.6. Воздушные датчики для: а — линейных перемещений; б — диаметра отверстий, в — конусности отверстий; г — кривизны выверленных отверстий

ния искривленности высверленных отверстий. В иных ситуациях могут быть созданы другие формы датчиков. Поверхность измеряемого объекта должна быть гладкой и непористой. Смещение поплавка в ротаметре может быть в 5000...10000 раз больше, чем фактическое измеряемое перемещение объекта.

Дополнительная литература: Brooker K. (ed.) (1984), *Manual of British Standards in Engineering Metrology*, Hutchinson.

Электрические измерения линейных перемещений

Существует много видов электрических датчиков, которые могут быть использованы, чтобы получить реакцию на перемещение. Например, линейный потенциометр (см. главу 8 и **Рис. 8.4**), конденсаторы (см. главу 8, **Рис. 8.6** и **Рис. 8.8**), изменяемое магнитное сопротивление (см. главу 8, **Рис. 8.10** и **Рис. 8.12**), линейно-регулируемый дифференциальный трансформатор (см. главу 8 и **Рис. 8.13**).

8. Конденсатор

Конденсаторные системы для измерения перемещений имеют высокий выходной импеданс (как следствие этого, они очень подвержены воздействию шумов). Такие системы обладают хорошим разрешением (могут достигать порядка нанометров) и точностью вплоть до $\pm 0.01\%$.

9. Переменное магнитное сопротивление

На **Рис. 13.7** показана одна из разновидностей *компаратора с изменяющейся индуктивностью*. Движение плунжера вызывает перемещение ферромагнитной пластинки между двумя катушками, при этом магнитное сопротивление в одной из них увеличивается, а в другой — уменьшается. Другой вид компаратора представлен на **Рис. 8.12**. В обоих случаях две катушки включены в регулируемые плечи моста переменного тока, и сигнал его разбаланса является мерой перемещения. Такие компараторы имеют малый диапазон измерений, обычно 0...10 мм, плохую линейность и точность около $\pm 0.5\%$.

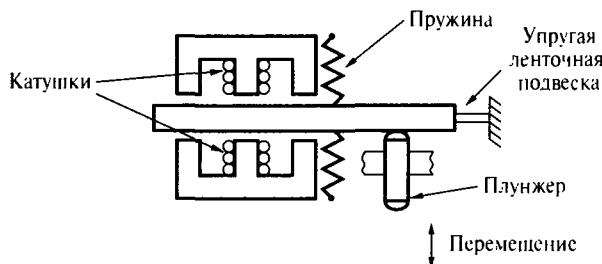


Рис. 13.7. Компаратор перемещений на принципе переменного магнитного сопротивления

10. Линейно-перестраиваемый дифференциальный трансформатор

Линейно-перестраиваемый дифференциальный трансформатор (ЛПДТ) широко используется для измерения перемещений (см. главу 8 для более полного ознакомления). Он пригоден для применения и в диапазоне малых перемещений порядка $0...0.2$ мкм, и больших перемещений порядка $0...500$ мм. Он прочный, линейный, имеет высокую надежность и высокую чувствительность. Его точность составляет около $\pm 0.5\%$.

11. Линейный индуктосин

Линейный индуктосин (**Рис. 13.8**) состоит из трека, вдоль которого перемещается скользящий движок. Движок прикреплен к объекту, положение которого или перемещение должны быть измерены. Это может быть режущий инструмент, поэтому линейный индуктосин широко применяется для контроля работы механических станков. Трек может иметь длину до нескольких метров. Он выполняется из тонкой металлической проволоки, сформированной в виде одинарной непрерывной линии прямоугольного серпантина. Типичный шаг такого серпантина около 2 мм. Скользящий движок ложится поверх трека и также выполняется в виде прямоугольных волн, но он намного короче, чаще около 50 или 100 мм. Он имеет две отдельные проволочные секции. Однако волны каждой из них смещены друг относительно друга на четверть их периода колебаний. Это значит, что, когда длина одной проволочной секции движка совпадает с волной трека, то другая секция движка будет иметь вылет на четверть периода (как показано на **Рис. 13.8**).

Когда переменный ток течет по проводу трека, в проволочных секциях движка индуцируется э.д.с. Для одной проволочной секции движка выражение для э.д.с. V_1 в зависимости от его перемещения x записывается в виде:

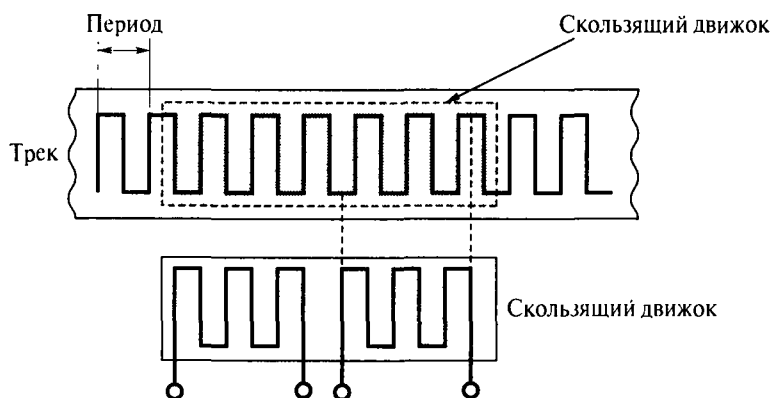


Рис. 13.8. Линейный индуктосин

$$V_1 = kV \sin(2\pi x / p),$$

где k — постоянная величина, V — величина напряжения на трек-ке, p — шаг волновой формы. Для другой проволоочной секции, сдвинутой на четверть периода, т.е. на 90° , э.д.с. V_2 связана с перемещением движка выражением:

$$V_2 = kV \sin[(2\pi x / p) + 90^\circ] = kV \cos(2\pi x / p).$$

Сумма этих двух напряжений равна напряжению с амплитудой, периодически повторяющейся каждый раз при перемещении x движка на шаг p . Так как такой индуктосин не может однозначно интерпретировать перемещения больше чем на шаг, т.е. около 2 мм, он обычно используется вместе с другими датчиками, имеющими более грубое разрешение, но больший диапазон измерений. Индуктосин имеет точность около ± 2.5 мкм.

Оптические измерения линейных перемещений

12. Позиционно-чувствительные фотоэлементы

В позиционно-чувствительном фотоэлементе *разделенного типа* (Рис. 13.9) луч света падает на фотоэлемент, который поделен посередине. Когда луч находится в центральной части, одинаковые сегменты обоих фотоэлементов будут освещены. Смещение луча света приводит к большей доле освещенности одного элемента по сравнению с другим. В результате на выходе дифференциального усилителя возникает сигнал. Диапазон измерения перемещений для такого инструмента составляет несколько миллиметров. Такие приборы могут определять изменение смещения порядка 1 мкм и обладают хорошей стабильностью.

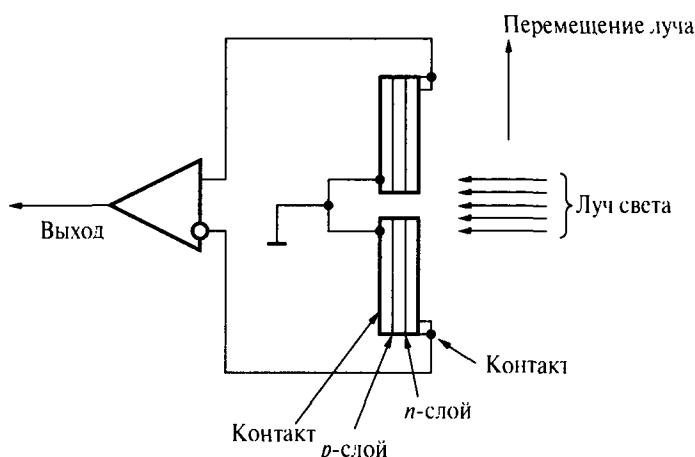


Рис. 13.9. Фотоэлемент разделенного типа

13. Муаровые полосы

Муаровые полосы возникают, когда луч света проходит через две решетки, имеющие наклон под небольшим углом друг к другу. **Рис. 13.10а** показывает схему такого прибора, работающего на проходящем свете, а **Рис. 13.10б** — схему прибора, работающего на отраженном свете. В обоих случаях длинная решетка зафиксирована на объекте, который передвигается. Для варианта на проходящем свете каждая решетка имеет ряд параллельных прямых темных полос, между которыми находятся параллельные прозрачные полосы, через которые проходит свет. Для варианта на отраженном свете длинная решетка имеет серию параллельных отражающих полос. А короткая решетка — серию параллельных прозрачных полос. При грубом графлении решетки имеют 10...40 полос на миллиметр, а при тонком — до 400 полос на миллиметр. Движение длинной решетки относительно фиксированной короткой приводит к перемещению муаровых полос по приемной зоне фотоэлемента, так что его выходной сигнал колеблется вверх и вниз. Этим методом можно зафиксировать малые перемещения вплоть до 1 мкм. Такие методы имеют высокую надежность и применяются как средство инструментального контроля.

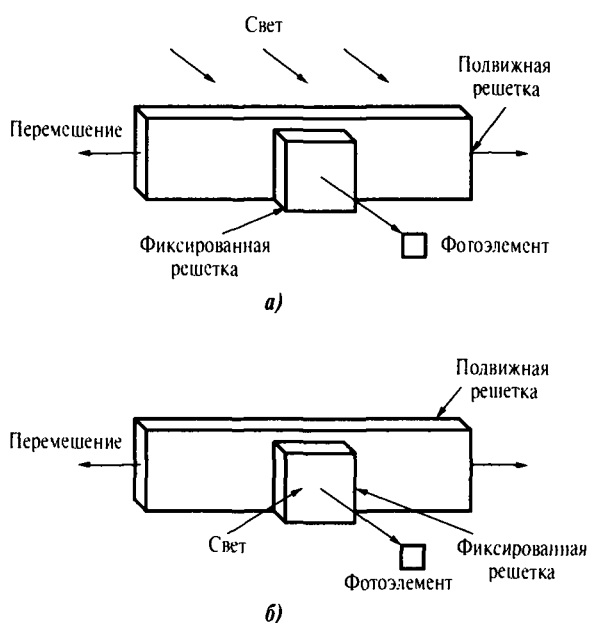


Рис. 13.10. Метод муаровых полос

14. Интерферометры

На **Рис. 13.11** показана одна из разновидностей **лазерного интерферометра** для измерения перемещений. Гелий-неоновый лазер генерирует две световые волны, отличающиеся по частоте на 2×10^6 Гц и имеющие плоскости поляризации под пря-

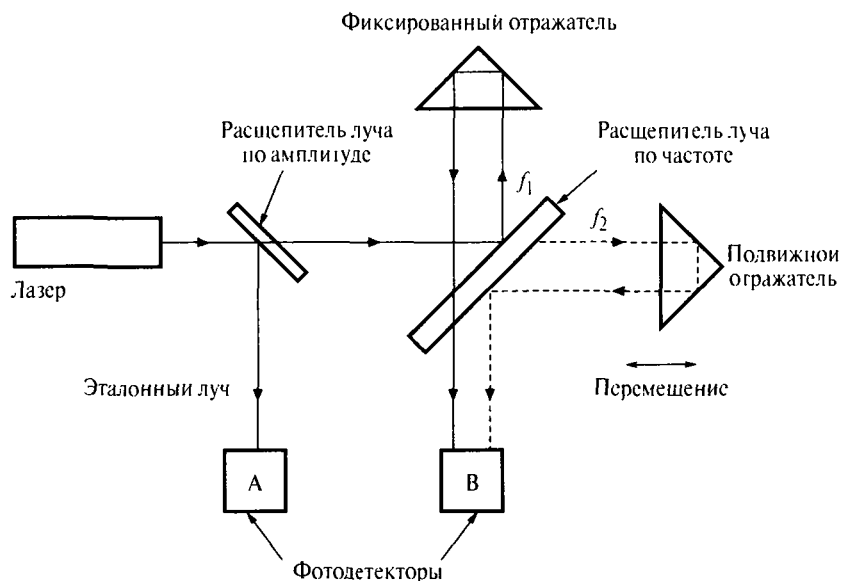


Рис. 13.11. Интерферометр

мым углом друг к другу. На первом лучевом расщепителе свет каждой частоты разделяется на две части, одна из которых используется как опорная и подается на фотодетектор А. На нем обе частоты комбинируются, создавая биение колебаний с частотой 2×10^6 на выходе. Второй лучевой расщепитель также разделяет свет на две частоты. Свет с частотой f_1 поступает на фиксированный отражатель уголкового типа и возвращается назад через лучевой расщепитель на фотодетектор В. Свет с частотой f_2 поступает на подвижный отражатель уголкового типа и возвращается назад к лучевому расщепителю и далее попадает также на фотодетектор В. При стационарном режиме подвижного отражателя выходной сигнал от фотодетектора В равен сигналу от фотодетектора А. Однако при возникновении движения появляется Доплеровский сдвиг частоты f_2 , и тогда выходной сигнал В будет отличаться от сигнала А. Выходные сигналы А и В вычитаются. В результате появляется колебательный сигнал, количество пиков которого связано с перемещением, а частота связана со скоростью. Такой метод обладает исключительно высокой точностью, несколько частей на миллион, и может использоваться в широком диапазоне измерений, вплоть до 2 м.

15. Времяпролетный метод

Во времяпролетном методе для определения расстояния обычно используются импульсы излучения от лазера, и измеряется время их прохождения до отражателя и обратно. Так как скорость света высока, в воздухе она равна 3×10^8 м/с, этот метод пригоден только для больших расстояний, когда время пролета света достаточно велико, чтобы быть измеренным с приемлемой точностью.

Электрические измерения угловых перемещений

16. Кольцевой и спиральный потенциометры

См. пункт 4 главы 8 для получения более подробной информации о потенциометрах. Кольцевой и спиральный потенциометры дают на выходе изменение сопротивления при вращении оси подвижного контакта, скользящего по треку резистора. Кольцевые потенциометры имеют трек длиной не более одного оборота, т.е. не более, чем угловое перемещение на 360° и точность примерно $\pm 1\%$. Спиральные потенциометры часто имеют многооборотный трек и могут обеспечить хорошую точность до $\pm 0.002\%$.

17. Синусно-косинусный вращающийся трансформатор

Синусно-косинусный вращающийся трансформатор (Рис. 13.12) имеет две статорные обмотки, развернутые под прямым углом друг к другу, и ротор. Для трансформатора с **выходным сигналом переменной амплитуды** статор питается однофазным синусоидальным напряжением с частотой ω , поэтому амплитуды в обмотках статора сдвинуты на 90° , т.е. справедливо:

$$V_1 = V \sin \beta,$$

$$V_2 = V \sin(\beta + 90^\circ) = V \cos \beta,$$

где V — мгновенное напряжение, равное $V_s \sin \omega t$.

Э.д.с., индуцируемая в роторе, когда он развернут на угол θ , равна:

$$V_0 = kV \sin(\beta - \theta) = [KV_s \sin(\beta - \theta)] \sin \omega t,$$

где k — постоянная величина, зависящая от степени магнитной связи. Выходной сигнал, таким образом, будет иметь ту же частоту, что и входной, но его амплитуда будет определяться углом θ . Возможное разрешение метода составляет около 0.4° .

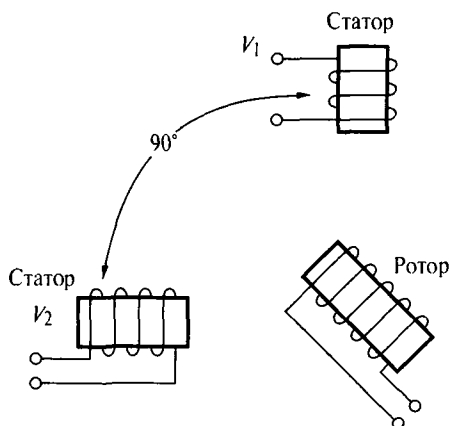


Рис. 13.12. Синусно-косинусный вращающийся трансформатор

18. Сельсин

Более подробную информацию о сельсинах можно найти в пункте 3 главы 8. Сельсин отличается от синус-косинусного трансформатора тем, что имеет три статорные обмотки, расположенные под углом 120° вокруг ротора. Синусоидальное напряжение здесь подается на ротор, и э.д.с., наводимая в каждой статорной катушке, зависит от ее ориентации относительно положения ротора, т.е.:

$$V_1 = kV \sin \theta,$$

$$V_2 = kV \sin(\theta + 2\pi/3),$$

$$V_3 = kV \sin(\theta - 2\pi/3),$$

где V — мгновенное напряжение на роторе, равное $V_r \sin \omega t$, k — постоянная величина, определяемая степенью магнитного взаимодействия, а θ — угловое положение ротора. Амплитуда напряжения каждого статора, таким образом, является мерой углового положения ротора. Сельсины используются для измерения углового перемещения. Но более типичным является их использование в паре друг с другом для передачи информации об угловом перемещении на расстояние.

Датчики положения оси

19. Дискретные датчики положения оси

См. пункт 28 главы 8 и **Рис. 8.29** для ознакомления с этими датчиками. Такие устройства дают выходной сигнал в цифровом коде, который соответствует угловому положению оси относительно начальной позиции. Разрешение определяется числом «окошек», которое может быть выполнено на вращающемся диске. Типичное значение этих чисел меняется в пределах 60...1000, и при этом разрешение получается равным $6...0.3^\circ$, а иногда даже лучше.

20. Цифровые датчики положения оси

См. пункт 29 главы 8 и **Рис. 8.30** для ознакомления с этими датчиками. Такие устройства измеряют абсолютное положение оси в пределах одного оборота. Обычно они имеют 10 или 12 треков. Десятитрековый датчик дает 1024 отсчета на оборот и имеет разрешение около 0.4° . Двенадцатитрековый датчик соответственно дает 4096 отсчетов на оборот, и его разрешение составляет 0.1° . Возможно создание устройств, содержащих до 21 трека, которые дают разрешение около 1 секунды.

Оптические измерения угловых перемещений

См. пункт 12 главы 9 и **Рис. 9.19** для ознакомления с оптическими принципами измерений.

21. Автоколлиматор

На **Рис. 13.13** показан основной принцип работы автоколлиматора. Освещенная визирная проволочка монтируется в фокусе коллимирующей линзы. Визирная проволочка и ее отраженное изображение рассматриваются через окуляр, в котором имеется шкала делений с интервалом 0.5 мин. Дополнительно имеется пара установочных проволочек, положение которых может перестраиваться с помощью микрометра, градуированного с интервалом 0.1 с. При использовании прибора установочные проволочки смещаются так, чтобы они не совпадали с изображением визирной проволочки, и производится считывание показаний. Процедура повторяется после поворота отражателя. Разница показаний и дает значение угла поворота.

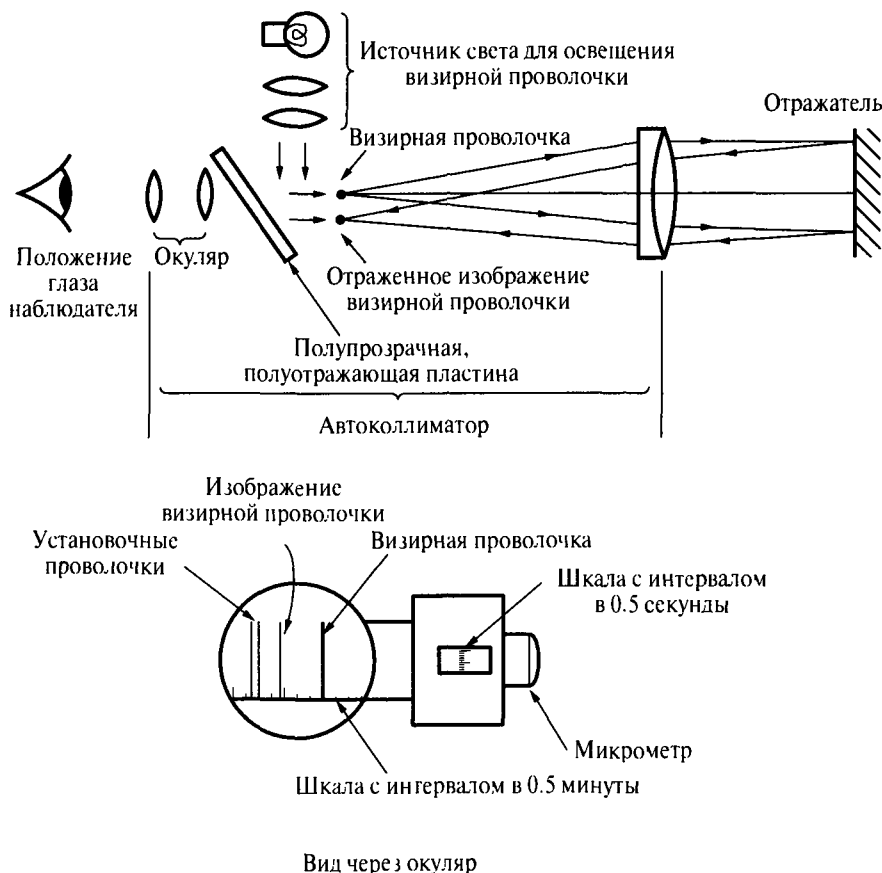


Рис. 13.13. Автоколлиматор

22. Зеркально-линзовый угломер

На **Рис. 13.14** показан базовый принцип этого устройства. Шкала, выгравированная на экране, подсвечивается лампой. Этот экран помещается в фокальной плоскости линзы-коллиматора. Свет, проходящий через эту линзу, отражается от зеркала назад, вновь проходит через линзу и фокусируется на шкале. Экран в приемной зоне отраженного изображения имеет другую шкалу, расположенную под прямым углом к шкале отраженного изображения. Смещение изображения шкалы выше или ниже исходной линии шкалы фиксированного экрана даст измерение угла зеркала в конкретном направлении. Движение изображения отраженной шкалы по шкале фиксированного экрана является мерой угла поворота зеркала в направлении под прямым углом к первому направлению. Шкала градуирована в минутах, и возможна оценка с точностью до 0,2 мин.

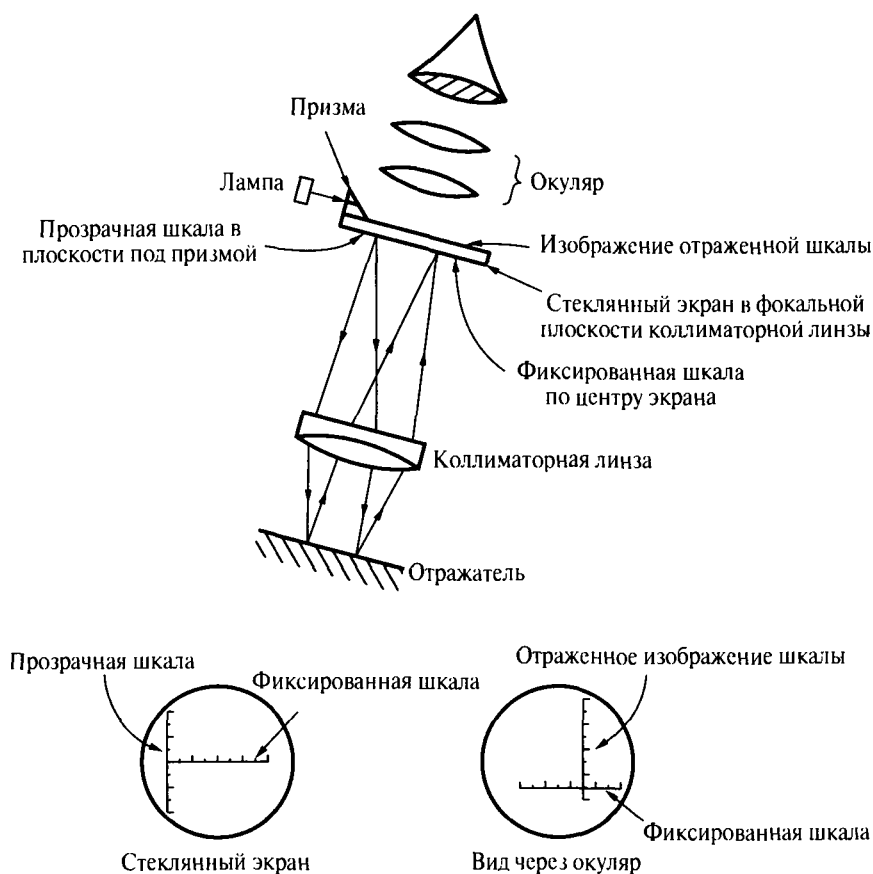


Рис. 13.14. Зеркально-линзовый угломер

14. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

В Табл. 14.1 перечислены измеряемые величины, методы и приборы для их измерения, обсуждаемые в данной главе.

Табл. 14.1. Электрические измерения

Измерения	Приборы	Характеристики
Постоянный ток	1. Магнитоэлектрические измерители	Диапазон измерений 10 мкА...10 А, он может быть расширен до 10 А при помощи шунтов, шкала линейная, точность $\pm 0.1\%$
	2. Свето-лучевые гальванометры	Чувствительность 100 мм/мкА, часто используются как нуль-детектор
	7. Мультиметр (тестер)	Диапазон измерений обычно 50 мкА...10 А, точность $\pm 1\%$
	10. Электронные измерители	Диапазон измерений 1 мкА...3 А, точность $\pm 1...2\%$
	13. Электронные мультиметры	Диапазон измерений 1 мкА...3 А, точность $\pm 1\%$, перепад напряжения 30 мВ
	14. Ферродинамические измерители	Диапазон измерений 0.1...30 А, точность $\pm 0.5\%$, шкала нелинейная, измеряют либо постоянный ток, либо переменный ток с частотой до 100 Гц
	17. Электродинамические измерители	Диапазон измерений 5 мА...20 А, шкала нелинейная, измеряют постоянный и переменный ток
	26. Цифровые измерители	Диапазон измерений 200 мкА...2 А, точность $\pm 0.2\% + 1$ цифра
Переменный ток	3. Магнитоэлектрические измерители	Диапазон измерений 10 мА...10 А при использовании токового трансформатора, частотная полоса 50 Гц...10 кГц, точность $\pm 1\%$, измерения корректны только для синусоидальных сигналов
	7. Мультиметры	Диапазон измерений обычно 10 мА...10 А, точность $\pm 2\%$
	11. Электронные измерители	Диапазон измерений 1 мкА...3 А, точность $\pm 2...5\%$, частотная полоса 20 Гц...100 МГц
	13. Электронные мультиметры	Диапазон измерений 1 мкА...3 А, точность $\pm 2...5\%$, частотная полоса 20 Гц...100 МГц, перепад напряжения 30 мВ
	14. Ферродинамические измерители	Диапазон измерений 0.1...30 А, точность $\pm 0.5\%$, шкала нелинейная, измеряют либо постоянный ток, либо переменный ток с частотой до 100 Гц
	16. Термопарные измерители	Диапазон измерений 2...50 мА, шкала нелинейная, частотная полоса 10 Гц...50 МГц, хрупкость конструкции
	17. Электродинамические измерители	Диапазон измерений 5 мА...20 А, шкала нелинейная, измеряют постоянный и переменный ток
	26. Цифровые измерители	Диапазон измерений 200 мкА...2 А, точность $\pm 1\% + 2$ цифры, частотная полоса 45 Гц...1 кГц

Табл. 14.1 (продолжение)

Измерения	Приборы	Характеристики
Постоянное напряжение	4. Магнитоэлектрические измерители	Диапазон измерений 50 мВ...100 В при использовании добавочных сопротивлений, шкала линейная, точность $\pm 0.1\%$
	7. Мультиметры (тестеры)	Диапазон измерений обычно 100 мВ...3 кВ, точность $\pm 1\%$
	8. Электронные измерители	Диапазон измерений 15 мВ...1000 В, точность $\pm 1\%$, входное сопротивление около 10 Мом
	13. Электронные мультиметры	Диапазон измерений 10 мВ...1000 В, точность $\pm 1\%$, входное сопротивление около 100 Мом
	15. Ферродинамические измерители	Диапазон измерений от 50 В, измеряют либо постоянный ток, либо переменный ток с частотой до 100 Гц, низкое входное сопротивление около 50 Ом/В
	18. Электродинамические измерители	Измеряют либо постоянный ток, либо переменный ток с частотой до 2 кГц, нелинейная шкала
	23. Электростатические приборы	Высокое входное сопротивление, высокая точность, измеряют постоянный и переменный ток, диапазон измерений 100...1000 В
	24. Цифровые измерители	Точность не ниже $\pm 1\% + 1$ цифра, входное сопротивление не ниже 10 МОм, диапазон измерений 100 мВ...1000 В
Переменное напряжение	33. Потенциометры	Измеряют э.д.с., а также могут быть доработаны для измерения термоэлектрической э.д.с.
	5. Магнитоэлектрические измерители	Диапазон измерений 3...3000 В при использовании трансформаторов, шкала линейная, точность $\pm 0.1\%$, частотная полоса 50 Гц...10 кГц
	7. Мультиметры (тестеры)	Диапазон измерений обычно 3 В...3 кВ, точность $\pm 2\%$
	9. Электронные измерители	Диапазон измерений 100 мкВ...1000 В, точность $\pm 2...5\%$, частотная полоса 20 Гц...100 МГц, входное сопротивление около 10 Мом
	13. Электронные мультиметры	Диапазон измерений 10 мВ...1000 В, точность $\pm 2...5\%$, частотная полоса 20 Гц...100 МГц, входное сопротивление около 10 МОм, входная емкость 2 пФ
	15. Ферродинамические измерители	Диапазон измерений от 50 В, измеряют либо постоянный ток, либо переменный ток с частотой до 100 Гц, низкое входное сопротивление около 50 Ом/В
	16. Термпарные измерители	Частотная полоса 10 Гц...50 МГц, хрупкая конструкция, нелинейная шкала
	18. Электродинамические измерители	Измеряют либо постоянный ток, либо переменный ток с частотой до 2 кГц, нелинейная шкала
	23. Электростатические приборы	Высокое входное сопротивление, высокая точность, измеряют постоянный и переменный ток, диапазон измерений 100...1000 В
	25. Цифровые измерители	Точность не ниже $\pm 1\% + 3$ цифры, входное сопротивление 10 МОм, входная емкость 100 пФ, диапазон измерений 100 мВ...1000 В, частотная полоса 10 Гц...10 кГц

Табл. 14.1 (продолжение)

Измерения	Приборы	Характеристики
Сопротивле- ние	6. Омметры	Нелинейная шкала
	7. Мультиметры (тестеры)	Нелинейная шкала. диапазон измерений 2 кОм...20 МОм, точность $\pm 3\%$ в середине шкалы
	12. Электронные измерители	Нелинейная шкала, диапазон измерений обычно 100 МОм. точность $\pm 3\%$ в середине шкалы
	13. Электронные мультиметры	Нелинейная шкала, диапазон измерений до 100 МОм, точность $\pm 3\%$ в середине шкалы
	27. Цифровые измерители	Диапазон измерений 200 Ом...1000 МОм, точность не ниже $\pm 0.1\% + 1$ цифра
	28. Мосты Уитстона	Диапазон измерений 1 Ом...10 Мом
	29. Двойные мосты Кельвина	Диапазон измерений 0.1 мкОм...1 Ом
	30. Мосты для измерения больших сопротивлений	Измеряют большие сопротивления
	34. Простые дифференциальные трансформаторные мосты	Высокая точность, требуется немного дополнительных стандартных компонентов
	35. Двойные дифференциальные трансформаторные мосты	Высокая точность, требуется немного дополнительных стандартных компонентов
Мощность	36. Q-метры	
	19. Электродинамические измерители	Верхний предел измеряемой мощности 300 В $\times$ 20 А, минимум 5 Вт, используются для измерения как в цепи постоянного тока, так и в цепи переменного тока с частотой до 400 Гц, диапазон точности $\pm 0.1 \dots 0.5\%$
Коэффициент мощности	21. Электронные измерители	Диапазон измерений 0.1 Вт...100 кВт, частота до 100 кГц, диапазон точности $\pm 0.5 \dots 1\%$
	20. Электродинамические измерители	
Добротность	36. Q-метры	
Энергия	22. Счетчики ватт-часов	Измеряют использованную энергию в электрических сетях
Индуктив- ность	31. Мосты переменного тока	
	34. Простые дифференциальные трансформаторные мосты	Высокая точность, требуется немного дополнительных стандартных компонентов
	35. Двойные дифференциальные трансформаторные мосты	Высокая точность, требуется немного дополнительных стандартных компонентов
	36. Q-метры	

Табл. 14.1 (окончание)

Измерения	Приборы	Характеристики
Емкость	32. Мосты переменного тока	
	34. Простые дифференциальные трансформаторные мосты	Высокая точность, требуется немного дополнительных стандартных компонентов
	35. Двойные дифференциальные трансформаторные мосты	Высокая точность, требуется немного дополнительных стандартных компонентов
	36. Q-метры	
Частота	37. Цифровые частотомеры	Диапазон измерений 0...200 МГц. диапазон точности $10^5...10^9$
	38. Фигуры Лиссажу	Используются для измерения коэффициента частоты и фазы сигнала
	32. Мосты Вина	Обладают высокой точностью при измерении звукового диапазона частот

Магнитоэлектрические измерители

См. пункт 1 главы 10 и **Рис. 10.1** для получения более детальной информации об устройстве и принципе действия магнитоэлектрических измерителей. При использовании таких измерителей необходимо учитывать влияние нагрузки (см. главу 5).

1. Постоянный ток

Движение стрелки магнитоэлектрического измерителя уравновешивается пружиной, обеспечивающей возвратный момент и перемещение указателя вдоль шкалы такое, чтобы отклонение на полную шкалу прибора было при минимальном постоянном токе в диапазоне 10 мкА...20 мА. Более широкий диапазон измерений (обычно до 10 А) может быть достигнут при использовании шунтов (см. пункт 15 главы 9 и **Рис. 9.25**). На **Рис. 14.1** показана схема универсального шунта. Чувствительность зашунтированного измерителя, т.е. угловое отклонение катушки на единицу изменения тока, вычисляется по формуле:

$$\text{Чувствительность} = \frac{R_s S}{R_s + R_g},$$

где R_g — сопротивление гальванометра, т.е. катушки и соединенного с ней последовательно резистора, R_s — сопротивление шунта и S — чувствительность измерителя без шунта. Такие приборы имеют линейную шкалу, и их точность составляет $\pm 0.1\%$ от отклонения на всю шкалу. На такие измерители, как правило, не оказывают влияние внешние магнитные поля.

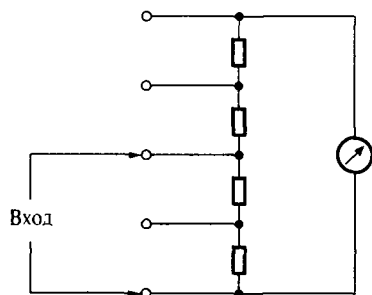


Рис. 14.1. Универсальный шунт

2. Светолучевой гальванометр

В мостах постоянного тока, где необходимо определить очень маленький ток, как нуль-детектор может использоваться **светолучевой магнитоэлектрический гальванометр** (Рис. 14.2). В состав такого гальванометра входит катушка с большим количеством витков, подвешенная на металлической полоске, скручивание которой обеспечивает возвратный момент. Поворот катушки заставляет луч света, отраженный от прикрепленного зеркала, перемещаться по шкале. Чувствительность по току в таких приборах обычно равна отклонению светового луча по шкале на расстояние около 100 мм при изменении тока на 1 микроампер.

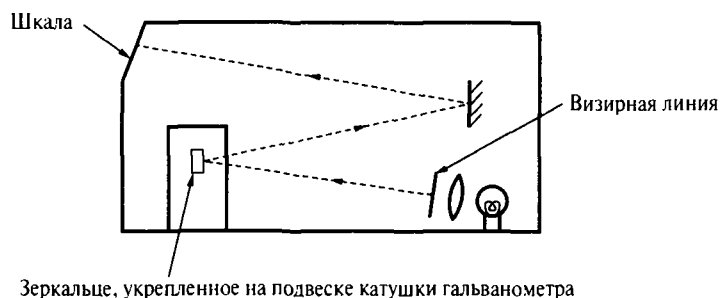


Рис. 14.2. Светолучевой магнитоэлектрический гальванометр

3. Переменный ток

Мостовой выпрямитель, такой как на Рис. 9.27, может быть использован для преобразования переменного тока в постоянный ток для измерения при помощи магнитоэлектрического измерителя. Измеритель реагирует на среднее значение тока, и шкала калибруется в единицах среднеквадратичных значений; здесь предполагается, что ток синусоидальный. Если это не так, то возникает погрешность калибровки шкалы, которую можно оценить следующим образом:

$$\text{Погрешность} = \left(\frac{1.11 - F}{F} \right) \times 100\% ,$$

где F — коэффициент формы сигнала. Можно получить различные диапазоны измерений тока, используя токовый трансформатор с обмотками, соответствующими этим диапазонам. Обычно отклонение на всю шкалу в таких приборах происходит при изменении переменного тока в интервале 10 мА...10 А. Точность составляет $\pm 1\%$ от отклонения на полную шкалу. Частотный диапазон равен 50 Гц...10 кГц.

4. Вольтметры для измерения постоянного напряжения

В магнитоэлектрических приборах измеряется ток, протекающий через известное сопротивление, и по его величине определяется значение напряжения. Для самого низкого диапазона измерений известное сопротивление — это просто сопротивление катушки измерителя. Для расширения диапазона измерений (см. раздел 16 главы 9 и **Рис. 9.26**) могут быть использованы добавочные сопротивления (**Рис. 14.3**). Чувствительность прибора с добавочным сопротивлением можно определить по формуле:

$$\text{Чувствительность} = \frac{S}{R_m + R_g},$$

где R_m — это последовательно включенное добавочное сопротивление, R_g — сопротивление катушки гальванометра, а S — чувствительность измерителя без добавочного сопротивления.

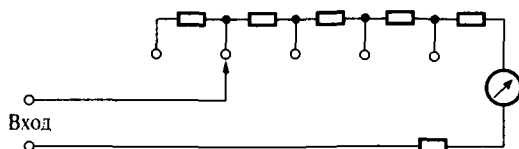


Рис. 14.3. Добавочные сопротивления

Как правило, отклонение на полную шкалу происходит при изменении сигнала в интервале 50 мВ...100 В. Точность составляет $\pm 0.1\%$ от отклонения на всю шкалу. Шкала линейная. При оценке влияния нагрузки необходимо учитывать отношение сопротивления вольтметра R_m к сопротивлению эквивалентной цепи R_{Th} , к которой он подключен (см. главу 5). Тогда точность с нагрузкой можно оценить следующим образом:

$$\text{Точность} = \frac{R_m}{R_m + R_{Th}} \times 100\%.$$

Таким образом, для получения точности, равной 99%, сопротивление R_m должно быть, по крайней мере, в 99 раз больше сопротивления R_{Th} . Для того чтобы прибор обладал высоким входным сопротивлением, он должен иметь высокое сопротивление

добавочного резистора, соединенного последовательно с гальванометром, у которого отклонение на всю шкалу происходит при низком уровне тока.

5. Вольтметры для измерения переменного напряжения

Для использования в цепи переменного тока в качестве вольтметра магнитоэлектрический измеритель должен иметь мостовой выпрямитель, например, такой, как показан на **Рис. 9.27**, и последовательно с ним соединенный добавочный резистор. В таких приборах минимальный диапазон измерения для отклонения на всю шкалу равен 3 В. При использовании трансформатора напряжения этот диапазон может быть расширен до 3000 В. У данного типа приборов линейная шкала, но она откалибрована так, чтобы корректно выдавать среднеквадратичные значения синусоидального переменного напряжения. Для других форм сигнала необходимо производить корректировку полученных данных (см. пункт 3 данной главы). Точность обычно не превышает уровень $\pm 1\%$ в частотном диапазоне 50 Гц...10 кГц. У таких вольтметров обычно низкое входное сопротивление, и поэтому возникают проблемы согласования с нагрузкой (см. раздел 4 данной главы).

6. Омметры

На **Рис. 14.4а** показана принципиальная схема омметра. Батарея с э.д.с E последовательно соединена с сопротивлением измерителя R_g . В эту цепь включается резистор R , величину которого надо измерить. Тогда по значению тока I , протекающего в этой цепи, можно оценить величину сопротивления резистора R , так как

$$I = \frac{E}{R + R_g}.$$

Зависимость между током и сопротивлением R является нелинейной, поэтому такой омметр обладает нелинейной шкалой. Нулевое значение сопротивления соответствует показанию прибора при отклонении на всю шкалу омметра. Обычно в цепь омметра включается переменный резистор для компенсации изменений э.д.с. батареи. При короткозамкнутых выводах омметра, т.е. при $R = 0$, резистор настраивается так, чтобы прибор был выставлен на нулевое значение, т.е. указатель прибора отклонился на всю шкалу.

На **Рис. 14.4б** показана другая принципиальная схема цепи омметра. Эта схема чаще всего применяется при измерении небольших значений сопротивлений. Когда сопротивление R бесконечно, т.е. цепь разомкнута, величина тока получается равной:

$$I_{fd} = \frac{E}{R_l + R_g}.$$

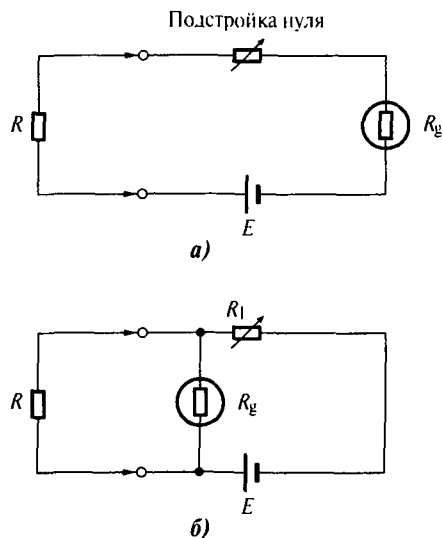


Рис. 14.4. Электрические схемы омметров

Измеряемое сопротивление подключается параллельно измерителю и работает как шунт, т.е. уменьшает ток, протекающий через измеритель. Следовательно, можно записать, что

$$\frac{E}{I} = R_l + \frac{R_g R}{R_m + R}.$$

Тогда ток в цепи омметра I_g можно определить как:

$$I = I_g + \frac{R_g I_g}{R}.$$

Следовательно,

$$I_g = \frac{ER}{R_l R_g + R(R_l + R_g)}.$$

Отсюда видно, что показания измерителя зависят от величины сопротивления измеряемого резистора.

7. Мультиметр (тестер)

Мультиметр — это многодиапазонный многофункциональный прибор, построенный на основе магнитоэлектрического измерителя. Типовой мультиметр имеет следующие диапазоны измерения:

- по постоянному току 50 мкА...10 А;
- по переменному току 10 мА...10 А;
- по постоянному напряжению 100 мВ...3000 В;
- по переменному напряжению 3...3000 В;
- по сопротивлению 2 кОм...20 МОм.

Точность типовых тестеров равна $\pm 1\%$ от отклонения на всю шкалу для измерений по постоянному току и $\pm 2\%$ от отклонения на всю шкалу для измерений по переменному току. Точность при измерении сопротивлений равна $\pm 3\%$ от среднего значения шкалы.

Электронные измерители

Магнитоэлектрические измерители имеют ряд недостатков: низкое входное сопротивление и низкую чувствительность при измерениях по переменному току. Эти недостатки могут быть устранены при использовании усилителя на входе магнитоэлектрического измерителя.

8. Постоянное напряжение

На Рис. 14.5 показана принципиальная схема электронного вольтметра для измерения постоянного напряжения. У таких вольтметров входное сопротивление обычно равно около 10 МОм, а точность составляет порядка $\pm 1\%$ от отклонения на всю шкалу. Диапазон измерений 15 мВ...1000 В.

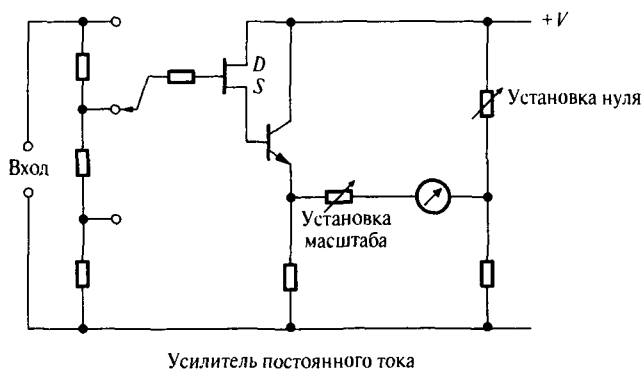


Рис. 14.5. Электронный вольтметр для измерения постоянного тока

9. Переменное напряжение

Существует несколько типов электронных вольтметров для измерения переменного напряжения. Электронные вольтметры усредняющего типа выдают на выходе среднее значение измеряемого напряжения. В таких приборах, как правило, используется выпрямитель напряжения, который ставится либо до, либо после усилителя (Рис. 14.6). Такие вольтметры обычно калибруются в среднеквадратичных значениях, считая входной сигнал синусоидальным. Если на самом деле сигнал несинусоидальный, то появляется погрешность калибровки шкалы и требуется корректировка полученных значений измерений (см. пункт 3). Электронные вольтметры пикового (амплитудного) типа выдают на выходе пиковые значения измеряемого напряжения. Такие приборы имеют в своем составе однополупериодные выпрямители, на выходе которых сто-

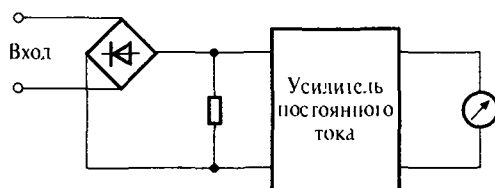


Рис. 14.6. Усредняющий электронный вольтметр

ит конденсатор, который и заряжается до пикового значения напряжения. Это пиковое значение затем усиливается и используется для отклонения указателя магнитоэлектрического измерителя (**Рис. 14.7а, б**). Электронные вольтметры среднеквадратичного типа выдают на выходе среднеквадратичное значение измеряемого напряжения. В состав таких приборов может входить термопара, выходной сигнал с которой пропорционален тепловой мощности, выделяемой резистором, к которому приложено усиленное измеряемое напряжение. Выходной сигнал термопары далее преобразуется при помощи усилителя постоянного тока и используется для отклонения указателя прибора. Шкала таких вольтметров калибруется в среднеквадратичных значениях напряжения (**Рис. 14.8**). Для устранения влияния нелинейности термопарных измерений такая же термопара включается в цепь обратной связи усилителя. Альтернативой использованию термопары может служить следующий метод: измеряемое напряжение выпрямляется, при помощи специальных схем возводится в квадрат, интегрируется в течение периода, из полученного значения берется квадратный корень, и результат подается на магнитоэлектрический измеритель. Обычно такие вольтметры дают отклонение на полную шкалу при изменении напряжения в интервале 100 мкВ...1000 В. Частотный диапазон равен 20 Гц...100 МГц, а точность находится в пределах $\pm 2...5\%$ и зависит от диапазона и частоты измеряемого сигнала.



а)



б)

Рис. 14.7. Пиковый электронный вольтметр

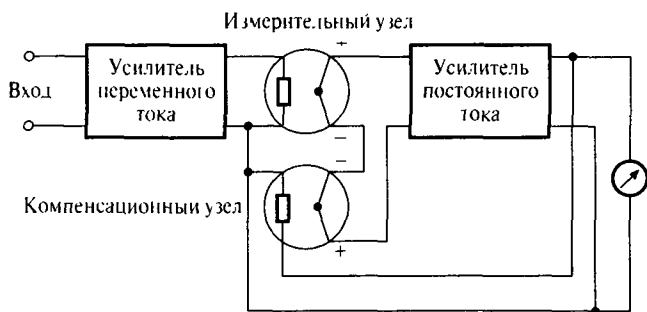


Рис. 14.8. Среднеквадратичный электронный вольтметр

10. Постоянный ток

Для измерения тока можно использовать вольтметр, состоящий из усилителя и измерителя, который, измеряя падение напряжения на известном резисторе, позволяет оценить величину тока в этой цепи. Обычно диапазон шкалы измерений для таких приборов равен $1 \text{ мкА} \dots 3 \text{ А}$, точность составляет $\pm 1 \dots 2\%$ от отклонения на всю шкалу. Входное сопротивление меняется в зависимости от диапазона измерений от кОм при измерениях малых токов до величины, меньшей 1 Ом , при измерениях больших токов.

11. Переменный ток

Переменный ток также измеряется путем определения падения напряжения на известном резисторе. Обычно диапазон шкалы измерений для таких приборов равен $1 \text{ мкА} \dots 3 \text{ А}$, точность составляет $\pm 2 \dots 5\%$ от отклонения на всю шкалу. Точность зависит от диапазона измерений и частоты. Частотная полоса равна $20 \text{ Гц} \dots 100 \text{ МГц}$.

12. Сопротивление

Если обеспечить протекание постоянного тока через резистор и измерить при этом падение напряжения на нем, можно оценить величину сопротивления этого резистора. Используя делители напряжения для подачи на электронный вольтметр только определенной части падения напряжения на измеряемом резисторе, можно обеспечить разные диапазоны измерений. Обычно ставится ряд таких делителей для обеспечения последовательности диапазонов измерений от $1 \text{ Ом} \dots 100 \text{ МОм}$. У таких приборов нелинейная шкала, и точность составляет $\pm 3\%$ от значения середины шкалы.

13. Мультиметр¹

Электронные мультиметры обладают большей чувствительностью по сравнению с обычными тестерами. Соответствующими переключателями диапазонов и функций при помощи элек-

¹ Приставка «мульти» означает многократность, т.е. мультиметр — прибор, измеряющий ряд величин (прим. ред.).

тронных мультиметров можно измерять постоянное и переменное напряжение, постоянный и переменный ток, сопротивление. В диапазонах измерения по постоянному току мультиметры обычно имеют входное сопротивление порядка 1 МОм/В, но не более 100 МОм. В диапазонах измерения переменного напряжения входная емкость равна порядка 2 пФ, а входное сопротивление изменяется в пределах 1...10 МОм. Такие мультиметры выдают падение напряжения на измеряемом сопротивлении порядка 30 мВ при измерениях по постоянному и переменному току. Диапазон шкалы измерений обычно равен 10 мВ...1000 В при измерениях постоянного и переменного напряжения и 1 мкА...3 А при измерениях постоянного и переменного тока. Точность диапазонов измерения по постоянному току составляет примерно $\pm 1\%$, а по переменному току $\pm 2...5\%$ и зависит от частоты. Частотный диапазон равен 20 Гц...100 МГц. Сопротивления величиной 1 Ом...100 МОм могут быть измерены на разных диапазонах с точностью примерно $\pm 3\%$ от значения середины шкалы.

Ферродинамический измеритель

Существуют два основных вида таких измерителей: один основан на магнитном притяжении, а другой — на магнитном отталкивании. В измерителях на принципе притяжения (**Рис. 14.9**) вращающийся диск из мягкой стали втягивается катушкой, когда через нее протекает электрический ток. Вращательный момент, полученный от этого притяжения, зависит от формы диска и всегда пропорционален квадрату силы тока в катушке. Этому моменту противодействует вращательный момент, создаваемый пружиной, который пропорционален углу поворота диска, а,

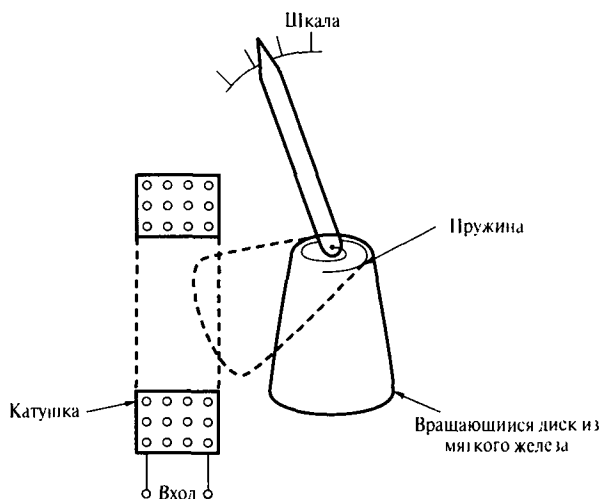


Рис. 14.9. Ферродинамический измеритель, основанный на принципе магнитного притяжения

следовательно, и прикрепленного к нему указателя. Таким образом, угловое отклонение указателя прибора пропорционально квадрату протекающего по катушке тока.

Измерители, основанные на принципе магнитного отталкивания (Рис. 14.10), имеют две пластинки из мягкого железа внутри катушки, одна из которых зафиксирована, а другая может двигаться, вращаясь вокруг оси. Один конец подвижной пластинки прикреплен к оси указателя прибора. При протекании тока через катушку обе пластинки одинаково намагничиваются и потому начинают отталкиваться друг от друга. Сила отталкивания зависит от величины тока, протекающего по катушке. Отклоняющий момент пропорционален квадрату этого тока, и ему противостоит восстанавливающий момент, создаваемый пружиной, который пропорционален результирующему углу поворота. Следовательно, угол отклонения указателя прибора пропорционален квадрату протекающего по катушке тока. Для предотвращения колебательных процессов в системе обычно используется демпфирующее устройство, состоящее из поршня,двигающегося в цилиндре.

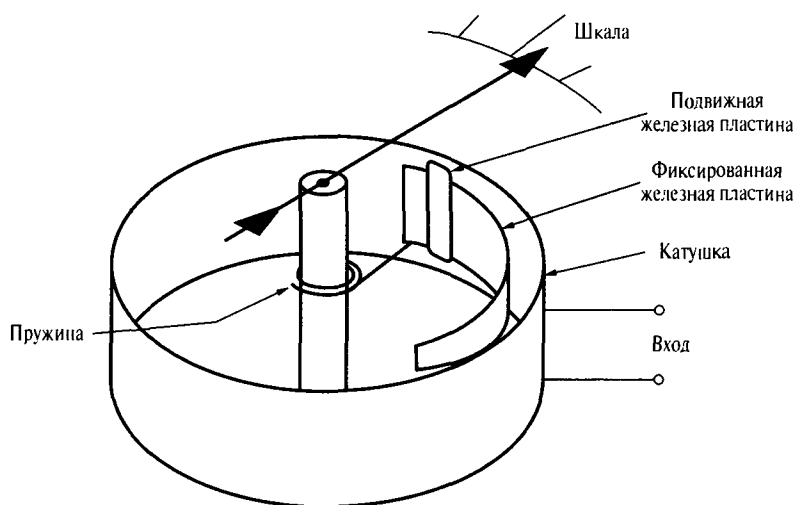


Рис. 14.10. Ферродинамический измеритель, основанный на принципе магнитного отталкивания

14. Ток

Так как отклонение указателя прибора зависит от квадрата протекающего по катушке тока, то направление этого тока не будет оказывать никакого влияния на показания измерителя. Таким образом, такие приборы могут использоваться для измерения и постоянного, и переменного тока. Ферродинамические измерители имеют нелинейную шкалу, наиболее сжатую в области низких значений тока. Для измерений переменного тока шкала калибруется в среднеквадратичных значениях тока. Без шунтирования

диапазон шкалы измерений обычно равен $0.1 \dots 30$ А. Точность таких приборов составляет около $\pm 0.5\%$ от отклонения на всю шкалу. При измерениях постоянного тока из-за влияния магнитного гистерезиса стали, из которой изготовлены пластины измерителя, показания прибора будут более низкими при медленном увеличении тока, чем при медленном уменьшении тока. При использовании резисторных шунтов при измерении переменного тока может появиться погрешность измерений из-за зависимости реактивного сопротивления катушки от частоты. Эта погрешность может быть уменьшена при использовании термокомпенсирующего резистора, установленного последовательно с измерителем, или при использовании емкостного шунта или такого шунта, у которого отношение индуктивности к сопротивлению равно аналогичному отношению для катушки прибора. Погрешность измерений может также возникнуть, если измеряемый сигнал имеет несинусоидальную форму. Частотный диапазон прибора при измерениях переменного тока не превышает 100 Гц.

15. Напряжение

Используемый в качестве вольтметра ферродинамический измеритель обладает относительно низким входным сопротивлением порядка 50 Ом/В. Минимальный диапазон шкалы измерений равен $0 \dots 50$ В. Такие вольтметры могут использоваться для измерения и постоянного, и переменного напряжения.

Термопарные измерители

Термопарные измерители имеют в своем составе термопару, используемую для измерения температуры резистора при протекании по нему тока. Выходной сигнал такой термопары может отслеживаться при помощи магнитоэлектрического измерителя постоянного тока. Так как тепловой эффект пропорционален току, протекающему через резистор, или квадрату разности потенциалов на нем, термопарные измерители могут быть использованы для измерения переменного тока и напряжения.

16. Переменный ток и напряжение

Термопарный прибор измеряет действующие среднеквадратичные значения. Измерения не зависят от формы сигнала. Частотный диапазон равен 10 Гц...50 МГц. Такие приборы обладают нелинейной шкалой. Диапазон измерения равен $2 \dots 50$ мА. Для измерения напряжения используется последовательно включенный резистор. Недостатками таких измерителей являются хрупкость конструкции и низкое предельно допустимое значение измерений.

Электродинамический измеритель

На **Рис. 14.11** показана принципиальная схема электродинамического измерителя. Он состоит из двух зафиксированных катушек, которые обеспечивают магнитное поле, заставляющее вращаться подвижную третью катушку при протекании через нее тока. Плотность магнитного потока B , созданного при протекании тока I_1 через две фиксированные катушки, пропорциональна величине этого тока. Вращающий момент, действующий на подвижную катушку при протекании через нее тока I_2 , пропорционален $B I_2$. Следовательно, вращательный момент пропорционален произведению токов $I_1 I_2$. Отклоняющий момент указателя прибора — это результирующий момент от действия вращательного момента и противостоящего ему восстанавливающего момента, создаваемого пружиной. Так как восстанавливающий момент пропорционален углу поворота подвижной катушки в состоянии равновесия, можно записать, что

$$\theta = \kappa I_1 I_2,$$

где κ — это некоторая константа. Внешние магнитные поля могут влиять на работу прибора, поэтому измеритель необходимо помещать в защитный корпус.

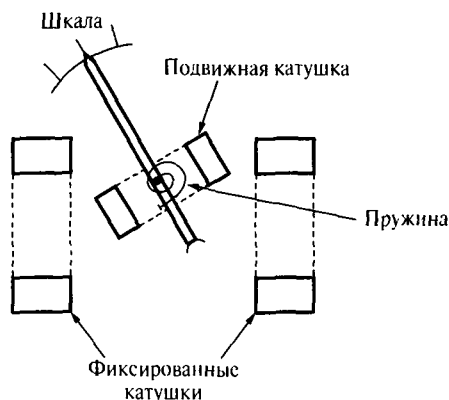


Рис. 14.11. Принципиальная схема электродинамического измерителя

17. Ток

Если фиксированные и подвижную катушки соединить последовательно (**Рис. 14.12**), т.е. $I_1 = I_2$, то угол поворота вращающейся катушки будет пропорционален квадрату тока. Такой прибор может быть использован для измерения как постоянного, так и переменного тока, выдавая показания в среднеквадратичных значениях, которые не зависят от формы сигнала. Устройство, показанное на **Рис. 14.12**, может быть использовано в диапазоне измерений на полную шкалу прибора, равном 5...100 мА. Для из-

мерения больших токов до 20 А подвижную катушку шунтируют небольшим сопротивлением (**Рис. 14.13**). Более высокие значения переменного тока могут быть измерены при помощи токового трансформатора. Электродинамические измерители имеют высокую стоимость и большее потребление электроэнергии по сравнению с магнитоэлектрическими преобразователями.

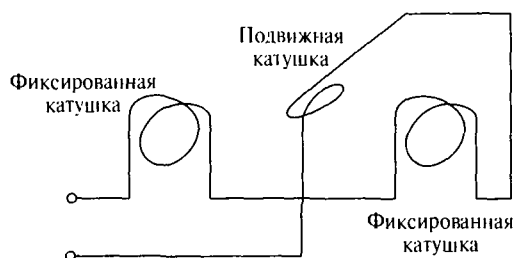


Рис. 14.12. Использование электродинамического измерителя в качестве миллиамперметра

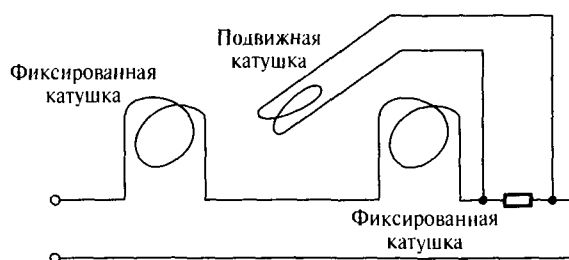


Рис. 14.13. Использование электродинамического измерителя в качестве амперметра

18. Напряжение

Если в схему измерения тока при помощи электродинамического измерителя, описанную выше, добавить последовательный резистор, то это будет уже схема вольтметра. Такой вольтметр может быть использован для измерения как постоянного, так и переменного напряжения с частотой до 2 кГц. Шкала нелинейная и калибруется в среднеквадратичных значениях, которые не зависят от формы сигнала.

19. Мощность

При измерениях потребляемой мощности стационарные катушки электродинамического измерителя соединяются последовательно с цепью, в которой проводятся измерения, в то время как подвижная катушка с последовательным резистором соединяется параллельно этой цепи нагрузки (**Рис. 14.14**). Так как угловое отклонение подвижной катушки пропорционально произ-

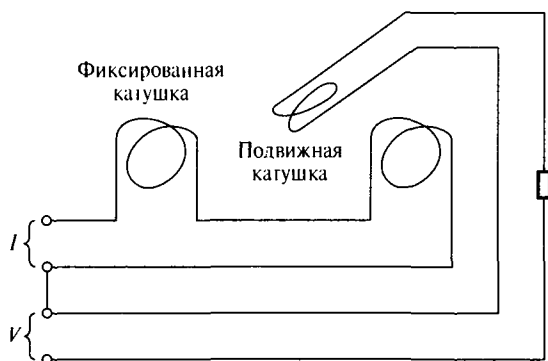


Рис. 14.14. Использование электродинамического измерителя в качестве ваттметра

ведению токов в подвижной и фиксированных катушках и по стационарным катушкам и цепи нагрузки течет один и тот же ток, а разность потенциалов на нагрузке пропорциональна току, протекающему через подвижную катушку, то угловое отклонение электродинамического измерителя пропорционально произведению тока на разность потенциалов в измеряемой цепи. Теоретически прибор должен непрерывно реагировать на изменение потребляемой мощности в цепи, но из-за наличия инерционности системы он будет измерять только среднее значение мощности. Данный прибор называется **ваттметром**.

На **Рис. 14.15** показаны два варианта подключения ваттметра к цепи измерения. На **Рис. 14.15а** разность потенциалов на подвижной катушке равна разности потенциалов на фиксированных катушках и нагрузке, а ток через фиксированные катушки

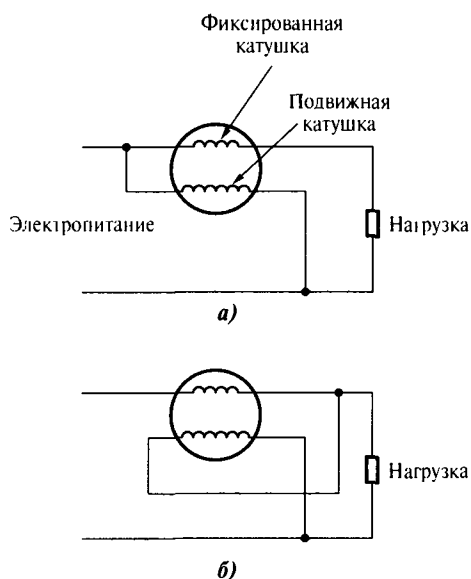


Рис. 14.15. Подсоединения ваттметра

определяет ток нагрузки. В то время как на **Рис. 14.15б** разность потенциалов на катушках равна разности потенциалов на нагрузке, а ток в фиксированных катушках равен сумме токов в подвижной катушке и нагрузке. В случае **(а)** показания ваттметра, соответствующие мощности в измеряемой цепи, определяются падением напряжения на фиксированных катушках, т.е. равны $I_L^2 R_f$, где I_L — ток нагрузки, а R_f — сопротивление фиксированных катушек. В случае **(б)** значения мощности, измеренной ваттметром, определяются током в подвижной катушке, т.е. равны V_L^2 / R_m , где V_L — разность потенциалов на нагрузке, а R_m — сопротивление подвижной катушки. В случаях измерения мощности в цепях с малым током, но большим напряжением предпочтительнее способ включения **(а)**, а в цепях с большим током и низким напряжением — предпочтительнее способ включения **(б)**.

Компенсационный ваттметр, в котором не требуется подключение внешних цепей коррекции, описанных выше, показан на **Рис. 14.16**. В нем каждая фиксированная катушка имеет две обмотки с одинаковым количеством витков. Одна из обмоток намотана проводом большого сечения и включена последовательно с цепью нагрузки, другая обмотка из провода меньшего сечения включена последовательно с подвижной катушкой. Часть обмотки, которая намотана тонким проводом, называется компенсационной обмоткой. Ток, протекающий по компенсационной обмотке, будет мал из-за ее большого сопротивления. Так как при таком включении направление тока в цепи нагрузки, а значит, и в части фиксированной катушки, намотанной толстым проводом, будет противоположно направлению тока, протекающего через компенсационную обмотку, то происходит требуемая компенсация магнитного потока. Таким образом, такой ваттметр будет показывать правильные значения мощности.

Ваттметры могут быть использованы при переменных и постоянных напряжениях до 300 В и токах до 20 А. Верхний предел частотного диапазона не превышает 400 Гц. Точность равна $\pm 0.1 \dots 0.5\%$ от отклонения на всю шкалу. Такие ваттметры непригодны для измерения значений мощности меньше 5 Вт.

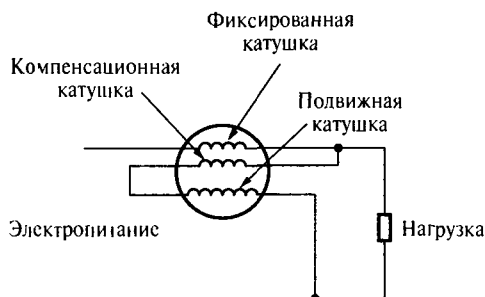


Рис. 14.16. Компенсационный ваттметр

20. Коэффициент мощности

Коэффициент мощности — это косинус угла между векторами тока и напряжения. **Измеритель коэффициента мощности с перпендикулярными катушками** — это электродинамический измеритель, в котором подвижный элемент состоит из двух катушек, смонтированных на одном валу и расположенных под прямым углом друг к другу (Рис. 14.17). Последовательно с одной из катушек включен элемент индуктивности, а последовательно с другой — резистор. Другие концы резистора и катушки индуктивности подключены к нагрузке. Токи в обеих катушках равны по величине, но во времени сдвинуты относительно друг друга на 90° . В этой конструкции электродинамического измерителя не используется возвратная пружина. Угол поворота подвижного элемента определяется результирующим моментом, создаваемым двумя перпендикулярными катушками. Результирующее угловое отклонение дает измерение сдвига фаз между током и напряжением.

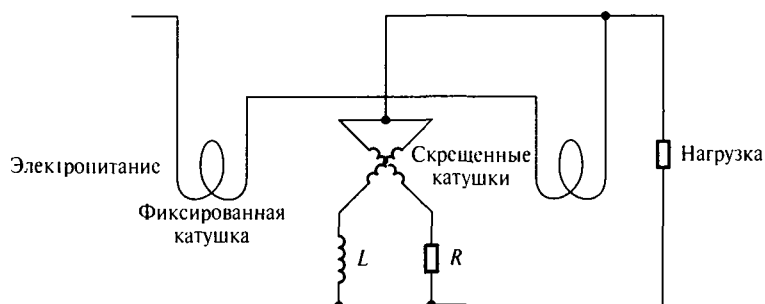


Рис. 14.17. Измеритель коэффициента мощности с перпендикулярными катушками

Электронный ваттметр

21. Мощность

Электронные ваттметры сначала перемножают входные сигналы, соответствующие току и разности потенциалов нагрузки, а затем определяют среднее за период значение этого произведения и выводят его на устройство отображения. Этот процесс может быть как непрерывным, так и дискретным. Для получения произведения тока на напряжение для непрерывного отображения мощности существует несколько способов. Один из способов — это использование импульсов, ширина которых определяется током, а высота — напряжением. Средняя за период площадь импульсов и есть величина средней мощности. Дискретный метод заключается в следующем: производится замер значений тока и напряжения через определенные промежутки времени, затем при помощи цифровых схем эти значения преобра-

зуются в цифровой вид, перемножаются и усредняются. Типичный диапазон измерений для цифровых ваттметров равен 0.1 Вт...100 кВт в интервале частот до 100 кГц. Точность таких ваттметров уменьшается с увеличением частоты и составляет около $\pm 0.5\%$ на низких частотах и $\pm 1\%$ на высоких частотах. Электронные ваттметры, использующие эффект Холла, могут быть применены в частотном диапазоне до нескольких ГГц.

Электросчетчики ватт-часов

22. Электроэнергия

Электросчетчики ватт-часов (Рис. 14.18) применяют для измерения потребляемой электроэнергии от электросетей переменного тока в домах и на производстве. Легкий алюминиевый диск, который может свободно вращаться в горизонтальной плоскости, своим краем проходит через воздушный зазор с магнитным полем, пересекая магнитный поток, создаваемый током, протекающим через нагрузку. Одновременно этот диск пересекает магнитный поток, создаваемый разностью потенциалов на нагрузке. Магнитный поток, определяемый напряжением на нагрузке, при помощи медного кольца смещен по фазе точно на 90° по отношению к потоку, определяемому током через нагрузку. Так как в нагрузке ток и напряжение переменные, то и магнитные потоки, создаваемые ими, являются также переменными, поэтому в алюминиевом диске индуцируются вихревые токи. Взаимодействие между этими токами и магнитными полями, в которых они расположены, заставляют алюминиевый диск вращаться. Средний

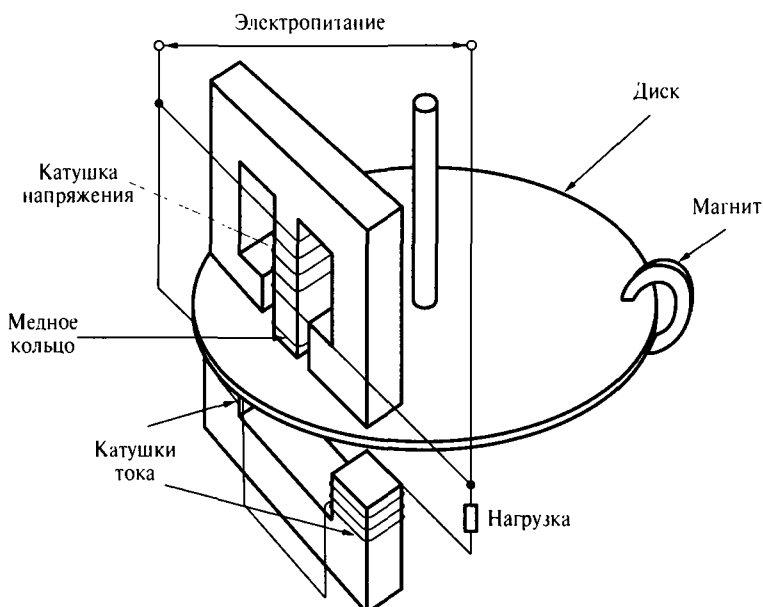


Рис. 14.18. Электросчетчик ватт-часов

вращательный момент, действующий на диск, пропорционален величине, равной $VI \cos \varphi$. Этому вращательному моменту противостоит действие постоянного магнита, который оказывает тормозящий эффект, индуцируя вихревые токи в движущемся диске. Этот тормозящий эффект пропорционален скорости вращения диска. В равновесном состоянии вращательный момент равен тормозящему моменту, и поэтому скорость вращения диска пропорциональна $VI \cos \varphi$. Вал, на котором укреплен алюминиевый диск, соединен через редуктор с механическим счетчиком, который, в свою очередь, на выходе регистрирует число, пропорциональное количеству потребленных ватт-часов.

Электростатические измерители

Принцип электростатических приборов основан на использовании сил, возникающих между двумя заряженными телами.

23. Напряжение

На Рис. 14.19 показан принципиальный вид электростатического вольтметра. Он состоит из четырех блоков, имеющих форму квадрантов, в которых может вращаться подвижная лопасть. На Рис. 14.19 приведен наиболее часто используемый вид соединения. Противоположные блоки соединены вместе, а подвижная лопасть соединена только с одной парой, поэтому пары блоков оказываются противоположно заряженными. Знак заряда определяется полярностью источника напряжения, к которому эта пара блоков подсоединена. Таким образом, на подвижную лопасть начинает действовать вращательный момент, который пропорционален квадрату напряжения. Пружина, в свою оче-

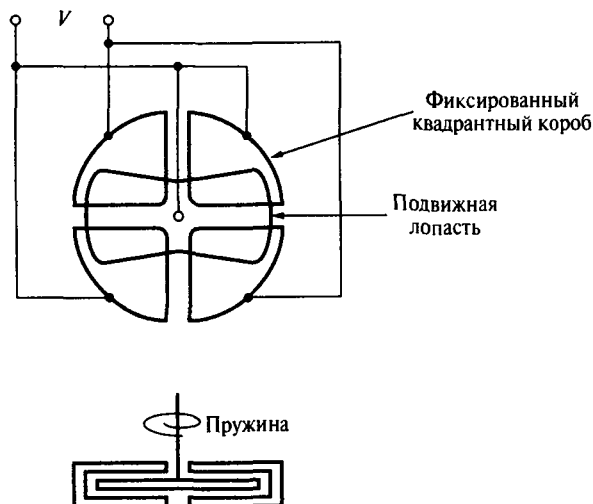


Рис. 14.19. Электростатический вольтметр

редь, создает возвратный момент, пропорциональный угловому перемещению лопасти. Очевидно, что при достижении равновесия угловое отклонение лопасти пропорционально квадрату напряжения. Из-за этого соотношения такие приборы могут быть использованы как при измерении переменного, так и постоянного напряжения. Шкала обычно калибруется в среднеквадратичных значениях. Такие приборы имеют высокое входное сопротивление, они точны, но у них хрупкая конструкция и высокая стоимость. Возможна многоблочная конструкция. Диапазон измерения таких приборов обычно равен 100...1000 В и выше.

Цифровые вольтметры

24. Постоянное напряжение

Цифровые вольтметры (см. главу 10) классифицируются по типу используемого аналого-цифрового преобразователя (см. пункт 25 главы 9). Наиболее распространенными преобразователями являются следующие типы: *последовательного приближения, интегрирующие, с двойным интегрированием и широтно-импульсные*. Приборы с использованием АЦП последовательного приближения и интегрирующие являются представителями дискретных измерителей, так как они выдают цифровые эквиваленты напряжения в дискретные моменты времени. Вольтметры с использованием АЦП двойного интегрирования и широтно-импульсные — это представители интегрирующих измерителей, которые выдают среднее значение напряжения через определенные интервалы времени. Интегрирующие измерители имеют более длительный процесс измерения, но у них лучшее шумоподавление.

В вольтметрах последовательного приближения замеренное значение входного напряжения сравнивается с напряжением, которое ступенчато увеличивается до тех пор, пока не станет равным входному напряжению. Обычно время преобразования 8-разрядного измерителя равно около 10 мкс. 16 — это максимальная разрядность таких измерителей. Частота опроса в таких вольтметрах обычно равна порядка 1000 и более раз в секунду.

Цифровые вольтметры с АЦП последовательного приближения являются одним из видов быстродействующих преобразователей. Для повышения быстродействия вместо сравнения входного напряжения с линейно нарастающим напряжением до достижения им требуемого значения можно производить одновременное сравнение входного сигнала с широким диапазоном значений напряжения, представленных в цифровом виде, при таком варианте соответствующий эквивалент напряжения находится гораздо быстрее. Такой тип вольтметров называется *вольтметром с параллельным преобразованием*. Время преобразования для таких вольтметров порядка 10 нс.

Интегрирующие вольтметры — это самый простой и недорогой вид цифровых вольтметров, в которых входное напряжение сравнивается с линейно нарастающим напряжением. В таких приборах время между двумя измерениями напряжения одинаково, и конечное значение линейно нарастающего напряжения соответствует значению входного напряжения. Недостатки таких вольтметров — недостаточное шумоподавление и повышенные требования к линейности нарастающего напряжения. Точность ограничивается уровнем $\pm 0.05\%$. Частота опроса может быть до 1000 раз в секунду.

В состав **вольтметров с двойным интегрированием** входит конденсатор, который заряжается измеряемым напряжением в течение времени, равного 1 периоду частоты сети переменного тока. Полученная разность потенциалов затем сравнивается с равномерно нарастающим линейным напряжением, и величина входного напряжения определяется по времени, необходимому для того, чтобы эти два значения сравнялись между собой. Преимущество таких вольтметров — ослабление шумов и сетевых наводок, но так как здесь происходит интегрирование входного сигнала в течение одного цикла частоты сети, то время преобразования для таких измерителей неизменно и равно обратной величине частоты сети, т.е. либо 1/50, либо 1/60 с. Точность вольтметров с двойным интегрированием около $\pm 0.005\%$.

Широтно-импульсные вольтметры вырабатывают импульсы, ширина которых, т.е. длительность, пропорциональна величине входного сигнала. Длительность импульсов затем измеряется при помощи счетчика тактовых импульсов. При интегрировании в течение времени, равного 1/50 или 1/60 с, происходит подавление сетевых наводок, возможно также получение высокого уровня дискретности, что важно для точности измерений.

Цифровые приборы выдают результаты измерений в виде числовых значений, что устраняет погрешности параллакса и интерполяции. Дискретность таких вольтметров определяется изменением напряжения, вызывающего изменение самого младшего разряда в числовых показаниях измерителя. Количество отображаемых на приборном дисплее знаков может быть 3.5...8.5. Половинка означает тот факт, что самая старшая цифра может принимать только два значения: либо 0, либо 1. Измерители с дисплеями для отображения 3.5 знака обычно имеют дискретность, равную 1:2000, и точность $\pm 0.1\%$ от показаний плюс 1 цифра, а приборы с дисплеями на 8.5 знака обладают дискретностью $1:2 \times 10^8$ и точностью 0.0001% от показаний плюс 0.00003% от максимального показания прибора. Обычно цифровые вольтметры обладают входным сопротивлением, равным более 10 Мом, входной емкостью — 40 пФ и высокой стабильностью. Диапазон измерений равен 100 мВ...1000 В, минимальный шаг дискретности — 1 мкВ.

25. Переменное напряжение

Методы, используемые для преобразования переменного напряжения в постоянное, подобны тем, которые применяются в магнитоэлектрических измерителях (см. начало этой главы). Так как выпрямители выдают на выходе средние значения, шкала таких измерителей обычно калибруется в среднеквадратичных значениях, и требуется корректировка показаний прибора в случае несинусоидальной формы сигнала. Истинные среднеквадратичные значения измерений могут быть получены либо при использовании термопары при измерении температуры резистора, к которому приложено входное напряжение, либо при использовании специальных электронных схем для возведения значения напряжения в квадрат с последующим извлечением квадратного корня. Обычно точность измерений лежит в пределах $\pm 1\%$ от показаний плюс 3 цифровых значения для приборов с дисплеем на 3.5 знака, и $\pm 0.05\%$ от показаний плюс 0.03% от максимального показания для приборов с дисплеем на 8.5 знака. Частотный диапазон равен 45 Гц...10 кГц для вольтметров с дисплеем на 3.5 знака и 10 Гц...100 кГц для вольтметров на 8.5 знака. Входное сопротивление обычно равно 10 Мом, а входная емкость — 100 пФ. Диапазон измерений равен 100 мВ...1000 В в среднеквадратичных значениях.

26. Ток

Значение как постоянного, так и переменного тока определяется по измеренной разности потенциалов на стандартном резисторе известной величины. Обычно точность таких приборов равна порядка $\pm 0.2\%$ от показаний плюс 2 цифры при измерении постоянного тока, и $\pm 1\%$ от показаний плюс 2 или более цифр при измерении переменного тока. Как при измерении постоянного, так и переменного тока диапазон измерений равен 2 мкА...2 А при падении напряжения меньше 0.3 В. Частотный диапазон равен 45 Гц...1 кГц.

27. Сопротивление

Зная значение тока, протекающего через измеряемый резистор, и измерив при помощи вольтметра разность потенциалов на нем, можно определить величину сопротивления этого резистора. Однако можно получить более высокую точность измерения, если одновременно пропустить точно такой же ток через дополнительный резистор известной величины и сравнить разность потенциалов на этих двух резисторах. Точность такого метода равна порядка $\pm 0.1\%$ от показаний плюс 1 цифра для приборов с дисплеем на 3.5 знака и $\pm 0.00002\%$ от показаний плюс $\pm 0.0004\%$ от максимального показания для приборов с дисплеем на 8.5 знака. Диапазон измеряемых сопротивлений 200 Ом...1000 Мом.

Мосты постоянного тока

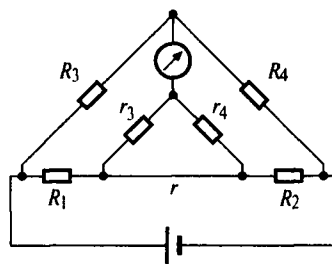
28. Мост Уитстона

Для более детального изучения мостов Уитстона смотрите пункт 1 главы 9. Такие мосты, как показано на **Рис. 9.1**, обычно используются для измерения сопротивлений в диапазоне 1 Ом...10 Мом.

29. Двойной мост Кельвина

Низкие значения сопротивлений могут быть измерены при помощи двойного моста Кельвина, показанного на **Рис. 14.20**. R_1 — измеряемое сопротивление, а R_2 — стандартное сопротивление приблизительно той же величины, что и измеряемое. Так как эти резисторы имеют небольшую величину сопротивления, такие измерения должны быть очень точными, для чего используются резисторы с четырьмя выводами. Два вывода подсоединяются к точкам, между которыми измеряется ток, а два вывода — между точками определения разности потенциалов. Это делается для того, чтобы устранить проблемы с неопределенностью, вносимой сопротивлением контактов. Иногда это сопротивление соединения между резисторами R_1 и R_2 даже учитывается и обозначается на схеме как r . R_3 , R_4 , r_3 и r_4 — это резисторы, два из которых, либо R_3 и r_3 , либо R_4 и r_4 , являются переменными. Соотношение между величинами сопротивлений этих резисторов выражается в виде:

$$\frac{R_3}{R_4} = \frac{r_3}{r_4}.$$



Резистор с четырьмя выводами

Рис. 14.20. Двойной мост Кельвина

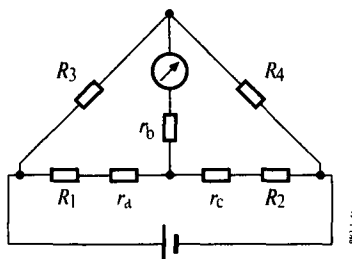


Рис. 14.21. Эквивалентная схема двойного моста Кельвина

Если применить к схеме на **Рис. 14.20** преобразование «треугольник — звезда», то получим эквивалентную схему двойного моста Кельвина, показанную на **Рис. 14.21**, где использованы следующие соотношения:

$$r_a = \frac{r_3 r}{r_3 + r_4 + r},$$

$$r_c = \frac{r_4 r}{r_3 + r_4 + r}.$$

Таким образом, условие баланса моста можно записать в виде:

$$\frac{R_1 + r_a}{R_2 + r_c} = \frac{R_3}{R_4}.$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} R_1 &= \frac{R_3(R_2 + r_c)}{R_4} - r_a = \frac{R_3 R_2}{R_4} + \frac{R_3 r_4 r}{r_3 + r_4 + r} - \frac{r_3 r}{r_3 + r_4 + r} = \\ &= \frac{R_3 R_2}{R_4} + \frac{r_4 r}{r_3 + r_4 + r} \left(\frac{R_3}{R_4} - \frac{r_3}{r_4} \right). \end{aligned}$$

Но так как R_3/R_4 равно r_3/r_4 , то условие баланса моста превратится в:

$$R_1 = \frac{R_3 R_2}{R_4}.$$

Такие мосты используются для измерения сопротивлений в диапазоне 0.1 мкОм...1 Ом.

30. Мосты для измерения больших сопротивлений

На **Рис. 14.22** показан модифицированный вариант моста Уитстона, который может быть использован для измерения больших значений сопротивлений. При измерении больших сопротивлений появляются проблемы, связанные с наличием утечек по параллельным цепям, поэтому в этом случае используются резисто-

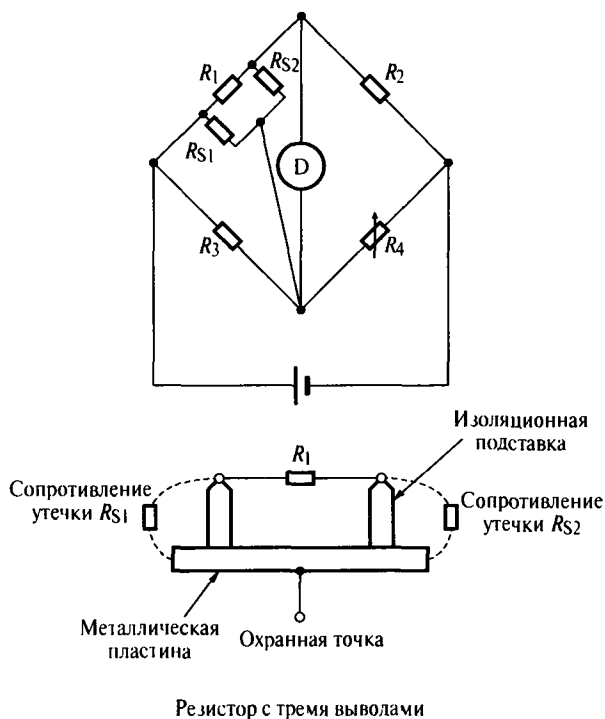


Рис. 14.22. Мост для измерения больших сопротивлений

ры с тремя выводами. В таких сопротивлениях сам резистор монтируется на изоляционной подкладке, размещенной на металлической пластине. Два вывода непосредственно подсоединяются к самому резистору, а третий вывод подсоединен к пластине. В такой конструкции всегда существуют сопротивления утечки между каждым выводом резистора и металлической пластиной. Когда резистор R_1 включается в мостовую схему, пластина подсоединяется к детектору в точке соединения резисторов R_3 и R_4 . При таком включении сопротивление утечки R_{S1} оказывается включенным в параллель с резистором R_3 , а так как сопротивление утечки R_{S1} намного больше величины сопротивления R_3 , его влиянием можно пренебречь. Сопротивление утечки R_{S2} оказывается включенным в параллель с индикатором, и его влияние сказывается только в небольшом изменении чувствительности индикатора.

Мосты переменного тока

Существует много типов мостов переменного тока, далее будут рассматриваться мосты, наиболее часто применяемые для измерения емкости и индуктивности. Смотрите главу 9 для более подробного изучения теоретических основ построения мостовых схем. Для определения условия баланса мостов могут использоваться следующие детекторы: наушники (с полосой пропускания 250 Гц...3 кГц), вибрационные гальванометры (свето-

лучевые гальванометры, которые настраиваются так, что их собственная частота становится равной частоте источника питания) и регулируемые усилители (настраиваемые на узкую полосу частот обычно в диапазоне 10 Гц...100 кГц по частоте, которая используется мостовой схемой).

Дополнительная литература: Hague B., Foord T.R. (1971), *Alternating Current Bridges*, Pitman.

31. Индуктивность

Далее приводятся примеры мостовых схем, которые используются для измерения величины индуктивности и сопротивления катушки индуктивности. Для более подробной информации см. главу 9. **Мост Максвелла (Рис. 9.8б)** используется для измерения индуктивности катушек, обладающих высокой добротностью. **Мост Максвелла—Вина** применяется только для измерения индуктивности катушек с малой добротностью. **Мост Оуэна (Рис. 9.8а)** используется для катушек с большой индуктивностью. **Мост Хей (Рис. 9.8в)** разработан для измерения параметров катушек индуктивности с очень высокими значениями добротности.

32. Емкость

Следующие примеры показывают применение мостовых схем для измерения величины емкости. В главе 9 содержится более подробная информация по этой теме. **Мост Де Сьюти (Рис. 9.9а)** определяет значение емкости, сравнивая его со значением другой известной емкости, однако здесь на точность измерений оказывает большое влияние коэффициент мощности конденсатора, из-за этого во многих случаях применение этой мостовой схемы сильно ограничено. **Мост Шеринга (Рис. 9.9в)** используется для измерения емкости и сопротивления конденсатора, и следовательно, для определения диэлектрических потерь. **Мост Вина (Рис. 9.9б)** имеет целый ряд применений. Он может быть использован для измерения величины емкости, если известна частота применяемого источника питания, и, наоборот, такая мостовая схема может применяться для определения частоты, если значение емкости известно. Мост Вина также может употребляться в качестве средства подавления какой-то определенной частоты.

Потенциометрические мосты

Потенциометр основан на компенсационном методе, при котором измеряемая разность потенциалов сравнивается с другой разностью потенциалов, которая будет меняться до тех пор, пока они не станут равны, после чего ток в этой цепи становится равным нулю.

33. ЭДС

Основные потенциометрические схемы, описанные в главе 9 и показанные на **Рис. 9.12**, могут быть использованы для сравнения неизвестной э.д.с. или разности потенциалов с известной ЭДС. В качестве эталона часто используется кадмиевый элемент Вестона, который при 15°C имеет э.д.с., равную 1.01880 В, а при 20°C — 1.01862 В. Для очень маленьких ЭДС, например, создаваемых термопарами, может применяться специальный адаптер, как показано на **Рис. 9.13**.

Трансформаторные мосты

34. Простые дифференциальные трансформаторные мосты

На **Рис. 14.23** показана принципиальная схема такого моста, т.е. трансформатора с обмотками, которые обеспечивают деление входного напряжения в отношении, определяемом соотношением числа витков в этих обмотках. Напряжение на обмотке N_1 пропорционально количеству витков на ней, т.е. N_1 , а на обмотке N_2 — пропорционально числу витков N_2 . Таким образом,

$$V_1 = kN_1 = I_1 Z_1,$$

$$V_2 = kN_2 = I_2 Z_2,$$

где k — это постоянная величина. Таким образом, ток в обмотках можно определить как:

$$I_1 = kN_1 / Z_1 \text{ и } I_2 = kN_2 / Z_2.$$

При условии баланса моста через индикатор не будет протекать никакой ток. Это означает, что I_1 будет равно I_2 , следовательно:

$$\frac{N_1}{Z_1} = \frac{N_2}{Z_2}.$$

Такой мост может применяться для измерения сопротивления, емкости и индуктивности элементов в широком частотном диапазоне. При измерении сопротивлений Z_1 может быть сопротивле-

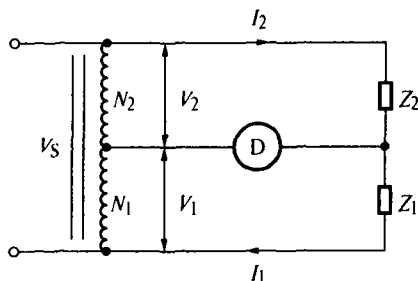


Рис. 14.23. Простой дифференциальный трансформаторный мост

нием R_x неизвестной величины, а Z_2 — эталонным сопротивлением с известным значением R_s . Тогда, если ток через индикатор равен нулю, отношение величин этих сопротивлений равно отношению количества витков в обмотках, т.е. справедливо:

$$R_x = \frac{N_1 R_s}{N_2}.$$

При измерении емкостей Z_1 может быть конденсатором с емкостью C_x неизвестной величины с эффективным параллельным сопротивлением R_x , а Z_2 — эталонным конденсатором известной емкости C_s с параллельным переменным сопротивлением R_s . Тогда при условии баланса мостовой схемы справедливо:

$$R_x = \frac{N_1 R_s}{N_2},$$

$$C_x = \frac{N_2 C_s}{N_1}.$$

35. Двойные дифференциальные трансформаторные мосты

На **Рис. 14.24** приведена принципиальная схема такого трансформаторного моста. Когда индикатор показывает нулевой ток, это означает, что магнитный поток в сердечнике второго трансформатора равен также нулю. Это и есть условие баланса моста, для достижения которого необходимо, чтобы были равны ампер-витки на обмотках второго трансформатора, т.е. $n_1 I_1 = n_2 I_2$, а, следовательно, должны быть равны также производимые ими магнитные потоки, которые направлены навстречу друг другу. Так как $I_1 = V_1/Z_1$ при $V_1 = kN_1$, а $I_2 = V_2/Z_2$ при $V_2 = kN_2$, то справедливо следующее:

$$\frac{n_1 N_1}{Z_1} = \frac{n_2 N_2}{Z_2}.$$

При использовании двойных дифференциальных мостовых схем требуется небольшое количество стандартных компонентов, но достигается больший диапазон измерений по сравнению с простыми дифференциальными мостами.

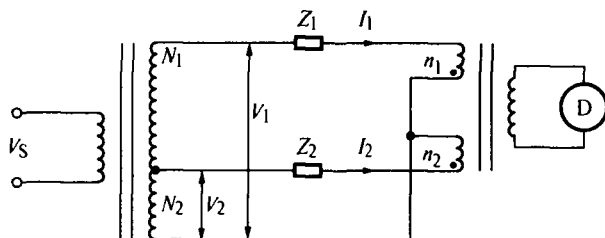


Рис. 14.24. Двойной дифференциальный трансформаторный мост

В качестве входного часто применяется трансформатор с многодекадным делителем. Такой трансформатор имеет ряд вторичных обмоток, каждая из которых, в свою очередь, имеет по девять отводов. Таким образом, для первой декады между отводами намотано по n витков, для второй декады — $10n$ витков, для третьей — $100n$ витков и т.д. Очевидно, что при использовании разных сочетаний этих обмоток с некоторым количеством стандартных компонентов можно получить удобную переменную шкалу с широким диапазоном измерений. Такая трансформаторная мостовая схема может быть использована для измерений сопротивлений, емкостей и индуктивностей в широком частотном диапазоне с верхним пределом около 250 МГц.

Q-метр¹

Добротность можно определить как:

$$Q = \frac{2\pi \times \text{максимальная накопленная энергия за период}}{\text{энергия, рассеянная за период}}.$$

Для последовательного колебательного контура (Рис. 14.25), в состав которого входят катушка индуктивности L и конденсатор C , добротность может быть определена следующим образом:

$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 CR},$$

где ω_0 — это резонансная частота данного контура. При резонансной частоте напряжение на конденсаторе V_c равно:

$$V_c = i_{\text{res}} \times \frac{1}{\omega_0 C}.$$

Однако резонансный ток определяется только сопротивлением контура R , и, следовательно, оно равно V_s / R . Тогда:

$$V_c = V_s \times \frac{1}{\omega_0 CR} = V_s \times \frac{\omega_0 L}{R} = V_s Q.$$

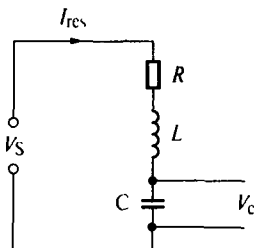


Рис. 14.25. Последовательный колебательный контур

¹ Q-метр — прибор для измерения добротности колебательного контура (прим. ред.).

Таким образом, напряжение на конденсаторе равно произведению добротности контура на величину напряжения источника.

36. Импеданс

На **Рис. 14.26** показана принципиальная схема Q-метра, основной частью которого является последовательный колебательный контур. К колебательному контуру через очень маленькое сопротивление порядка 0.02 Ом подключен генератор, который и обеспечивает протекание тока через контур. Такой генератор работает как источник напряжения V_s с очень маленьким внутренним сопротивлением. Это напряжение обычно измеряется при помощи термопарного измерителя, у которого есть специальная шкала, выдающая значение коэффициента, на который необходимо умножить измеренное на переменном конденсаторе напряжение V_c . Это напряжение V_c может быть измерено при помощи электронного вольтметра, обладающего шкалой, непосредственно откалиброванной в единицах добротности. На рисунке штриховой линией показано подключение катушки индуктивности неизвестной величины для измерения добротности такого LC -контура, а, следовательно, и величины индуктивности этой катушки. Правда, при таком подключении необходимо учитывать емкость самой катушки.

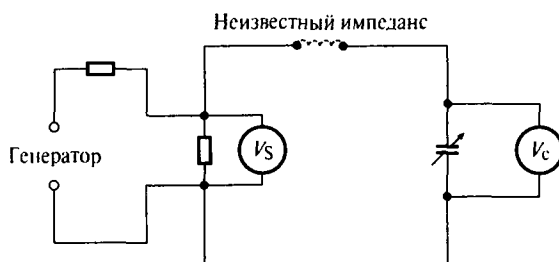


Рис. 14.26. Q-метр

Низкие значения импеданса, т.е. большие емкости, малые индуктивности и небольшие сопротивления определяются при помощи подсоединения неизвестного элемента, например конденсатора C_x , последовательно с переменным конденсатором и катушкой индуктивности (**Рис. 14.27а**). Сначала неизвестный конденсатор закорачивается и контур настраивается на резонанс, чтобы получить добротность Q . Если величина переменного конденсатора при этом будет равна значению C_1 , а резонансная частота контура — ω_0 , то добротность контура можно определить как:

$$Q_1 = \frac{1}{\omega_0 C_1 R}.$$

После этого неизвестный конденсатор подключается к контуру, который теперь настраивается на ту же самую частоту, как

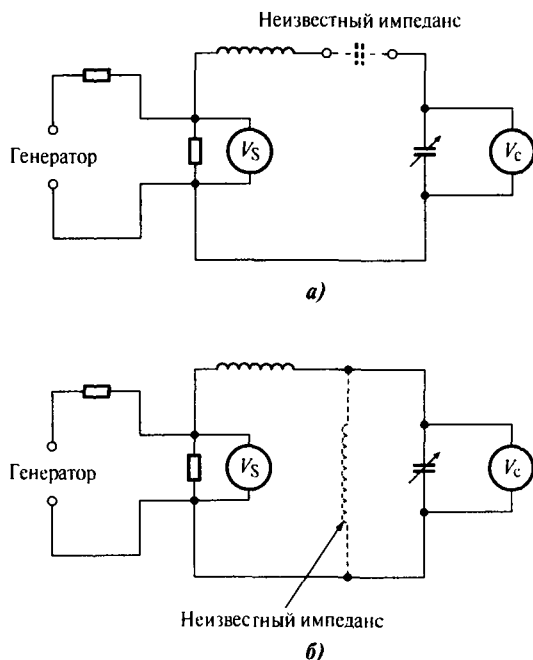


Рис. 14.27. *Q-метр: а — последовательное подключение; б — параллельное подключение*

и раньше, т.е. на ω_0 , при помощи регулировки переменного конденсатора до значения C_2 , при котором значение добротности будет равно Q_2 . Таким образом, емкость контура теперь определяется последовательным соединением емкостей C_x и C_2 . Так как резонансная частота контура в обоих случаях равна, то эта общая емкость должна быть равна значению C_1 . Следовательно,

$$\frac{1}{C_1} = \frac{1}{C_x} + \frac{1}{C_2},$$

$$C_x = \frac{C_1 C_2}{C_2 - C_1}.$$

Полное сопротивление цепи равно сумме сопротивления R и сопротивления утечки R_x , предполагается, что они включены параллельно измеряемому конденсатору. Следовательно,

$$R_x = \text{полное сопротивление} - R.$$

Но так как $R = 1/\omega_0 C_1 Q_1$, а полное сопротивление равно $1/\omega_0 C_2 Q_2$, то справедливо:

$$R_x = \frac{C_1 Q_1 - C_2 Q_2}{\omega_0 C_1 C_2 Q_1 Q_2}.$$

Добротность измеряемого конденсатора Q_x равна $1/\omega_0 C_x R_x$, следовательно, можно записать, что:

$$Q_x = \frac{Q_1 Q_2 (C_1 - C_2)}{C_1 Q_1 - C_2 Q_2}.$$

Если вместо большого конденсатора в схеме измеряемым элементом будет катушка с маленькой индуктивностью, то ее величина будет определяться выражением:

$$L_x = \frac{C_1 - C_2}{\omega_0^2 C_1 C_2}.$$

Если измеряемым элементом будет резистор, то величина емкости C_1 будет равна C_2 , так как при этом не будут меняться условия резонанса, отсюда следует, что:

$$R_x = \frac{Q_1 - Q_2}{\omega_0 C_1 Q_1 Q_2}.$$

В случае измерения элементов с высоким импедансом, т.е. малых конденсаторов, некоторых катушек индуктивности и больших резисторов, измеряемый компонент подсоединяется параллельно переменному конденсатору (**Рис. 14.276**). Сначала определяются условия резонанса без подключения измеряемого элемента, т.е. находится величина емкости переменного конденсатора C_1 и добротность Q_1 в момент достижения резонанса. Затем подсоединяется неизвестный элемент, и регулировкой переменного конденсатора добиваются резонанса при той же самой частоте. Если полученные значения емкости переменного конденсатора и добротности равны C_2 и Q_2 соответственно, то величина емкости измеряемого элемента C_x будет равна:

$$C_x = C_1 - C_2.$$

Если измеряемым элементом является катушка индуктивности L_x , то справедливо:

$$L_x = \frac{1}{\omega_0^2 (C_1 - C_2)}.$$

Если измеряемым элементом является резистор с сопротивлением R_x , то справедливо:

$$R_x = \frac{Q_1 Q_2}{\omega_0 C_1 (Q_1 - Q_2)}.$$

Добротность измеряемого компонента Q_x может быть определена следующим выражением:

$$Q_x = \frac{Q_1 Q_2 (C_1 - C_2)}{C_1 (Q_1 - Q_2)}.$$

Измерение частоты

37. Цифровые частотомеры

На Рис. 14.28 показана блок-схема цифрового частотомера. Для обеспечения стабильной частоты используется генератор на кварцевом резонаторе, который может быть нестабилизированным или стабилизированным по температуре, степень стабилизации зависит от требуемой точности и, следовательно, определяется количеством знаков устройства отображения. В типовом цифровом счетчике логический ключ открывается на время, равное n периодам частоты кварцевого генератора f , т.е. на время n/f . В течение этого времени считается количество периодов входного сигнала n_1 . Таким образом, частота входного сигнала определяется выражением $n_1/(n/f)$. При использовании обычного нестабилизированного генератора можно построить прибор с разрядностью пять или шесть цифр и обеспечить точность измерений порядка $10^{-5} \dots 10^{-6}$. В случае использования температурно-стабилизированных генераторов разрядность приборов становится 7...9 цифр, а точность измерений порядка $10^{-7} \dots 10^{-9}$. Для таких приборов характерен частотный диапазон 0...200 МГц.

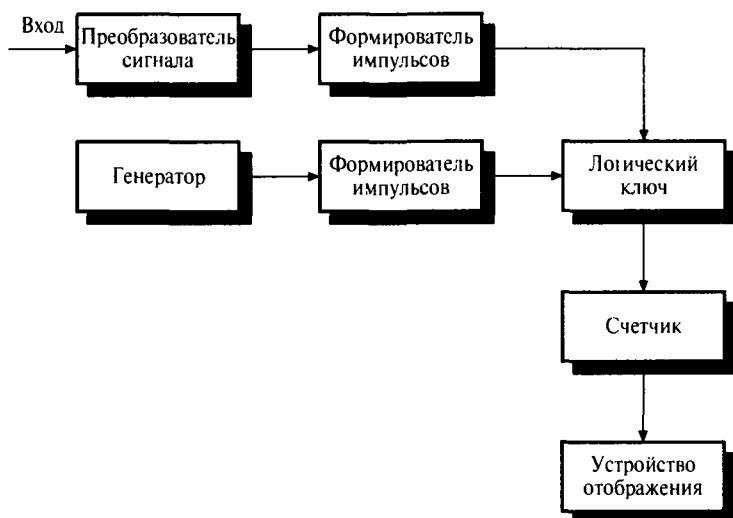


Рис. 14.28. Схема цифрового частотомера

38. Фигуры Лиссажу

Этот метод используется для сравнения частоты или фазы двух сигналов. Один сигнал подается на вертикально отклоняющие пластины осциллографа, а другой — на горизонтально отклоняющие пластины. Полученное изображение на экране электронно-лучевой трубки зависит от соотношения частот двух сигналов и разности их фаз. Отношение частот определяется подсчетом количества периодов в горизонтальном направлении n_x и

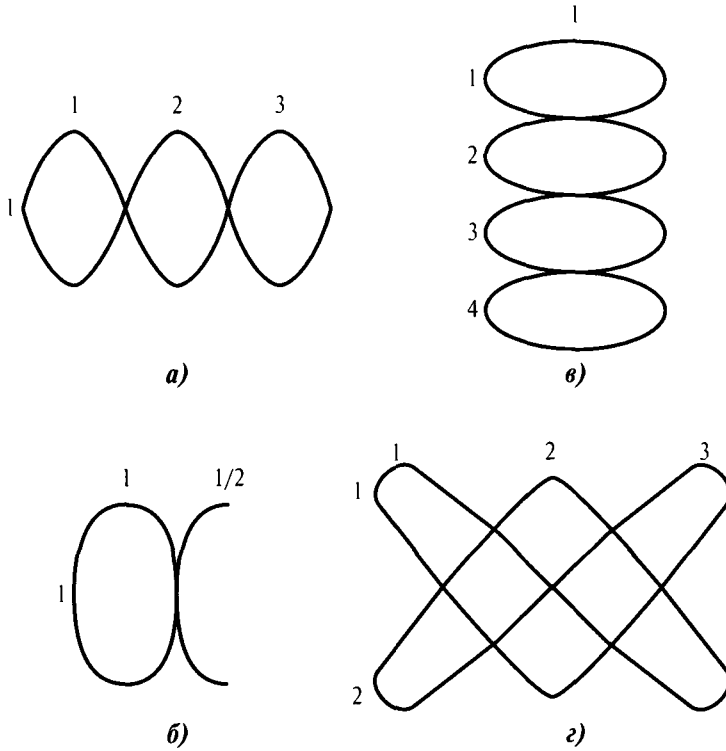


Рис. 14.29. Фигуры Лиссажу:

a — $f_y/f_x = 3/1$; *б* — $f_y/f_x = 1.5/1 = 3/2$;

в — $f_y/f_x = 1/4$; *г* — $f_y/f_x = 3/2$

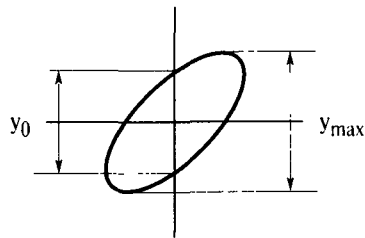


Рис. 14.30. Определение разности фаз двух сигналов по фигурам Лиссажу

числа периодов в вертикальном направлении n_y (Рис. 14.29). Тогда справедливо:

$$f_x n_x = f_y n_y.$$

На Рис. 14.30 показано изображение на экране осциллографа при равенстве частот двух сигналов. Здесь сдвиг фаз двух сигналов определяется выражением:

$$\sin \theta = \frac{y_0}{y_{\max}}.$$

15. ПОТОК

Термин *жидкость* используется для описания вещества, обладающего способностью течь, т.е. здесь имеются в виду и жидкости, и газы. Если движение жидкости подчинено какому-то порядку, то говорят о ее струйном движении или ламинарном потоке либо через трубу, либо по поверхности. При этом каждая частица жидкости движется строго по линиям, параллельным стенкам трубы. Частицы жидкости, непосредственно прилегающие к стенкам, движутся медленнее, что объясняется действием вязкости, а на самих стенках их скорость падает до нуля. Вследствие этого возникает градиент скорости (**Рис. 15.1а**). Вышеописанная ситуация характерна для скоростей потока меньше критической скорости. При больших скоростях потока движение становится хаотическим, и каждая частица жидкости в этом случае перемещается по очень извилистой траектории. Такое движение жидкости называют *турбулентным потоком*. Несмотря на хаотическую природу такого потока, в среднем для всего потока по трубе получается профиль скорости, подобный показанному на **Рис. 15.1б**. Можно считать, что по трубе течет ламинарный поток, если *число Рейнольдса* будет меньше, чем 2000, и турбулентный — если оно больше, чем 4000. Между этими величинами находится переходная зона.

$$\text{Число Рейнольдса} = \frac{D\nu\rho}{\eta},$$

где D — диаметр трубы, ν — скорость жидкости, ρ — плотность жидкости, η — ее вязкость.

Если средняя скорость жидкости по трубе равна ν , то за время t поток пройдет расстояние νt . Если площадь поперечного сечения трубы равна A , то объем жидкости, который переносится через него за время t , будет равен $A\nu t$. Таким образом, объемный расход Q выражается как $(A\nu t)/t$. Следовательно,

$$Q = A\nu.$$



Рис. 15.1. а — ламинарное течение; б — турбулентное течение

Движущаяся жидкость обладает потенциальной энергией, кинетической энергией, энергией давления и тепловой энергией. Полная энергия жидкости является суммой всех этих составляющих.

Понятие «гидродинамическое измерение» включает в себе определение трех параметров:

- собственной скорости жидкости в некоторой точке потока;
- объемного расхода потока;
- массового расхода потока.

В Табл. 15.1 приведен перечень систем гидродинамического измерения потоков жидкостей и их характеристики, обсуждаемые в данной главе.

Табл. 15.1. Системы гидродинамического измерения потоков

Принцип	Система	Характеристики
Объемный расход По перепаду давления	1. Трубка Вентури	Метод простой, точный, надежный, потери давления 10...15%, нелинейный, может применяться для разбавленных суспензий
	2. Измерительная диафрагма	Метод простой, дешевый, точность составляет порядка ± 1.5 , потери давления 50...70%, нелинейный
	3. Сопло	Дешевле, чем трубка Вентури, но дороже, чем измерительная диафрагма, потери давления 40...60%, точность $\pm 0.5\%$
	4. Трубка Далла	Большой перепад давления и большая компактность, чем у трубки Вентури, потери давления 4...6%
	5. Переменное сечение	Ротаметр: точность $\pm 1\%$, дешевый, диапазон измерений $30 \times 10^{-6} \dots 1 \text{ м}^3/\text{с}$
	6. Переменное проходное сечение	Линейный, диапазон измерений для воды до $3 \text{ м}^3/\text{с}$, до 200 бар по давлению и до 500°C по температуре
Механический	7. Мишень	Диапазон измерений приблизительно до $0.03 \text{ м}^3/\text{с}$, точность $\pm 0.5\%$, может применяться для загрязненных и вязких жидкостей
	8. Турбина	Диапазон измерений примерно до $1 \text{ м}^3/\text{с}$, точность $\pm 0.3\%$, хорошая воспроизводимость, дорогой
	9. Вращающаяся крыльчатка	Применяется для жидкостей и газов

Табл. 15.1 (окончание)

Принцип	Система	Характеристики
По вытеснению объема	10. Вращающийся плунжер	Точность $\pm 1\%$, применяется для воды
	11. Поршень	Точность $\pm 0.1\%$, широкий диапазон измерения. применяется для жидкостей
	12. Качающийся диск	Точность $\pm 1\%$, используется для жидкостей
	13. Вращающийся импеллер	Профилированные пары: используются для масел в диапазоне до $1 \text{ м}^3/\text{с}$ и до 80 бар по давлению. Кулачковые пары: используются для газов в диапазоне $0.003 \dots 3 \text{ м}^3/\text{с}$, точность $\pm 1\%$
	14. Вращающаяся крыльчатка	Используется для масел и горючих жидкостей, точность $\pm 0.1\%$
	15. Диафрагменный измеритель	Используется для измерения расхода бытового газа
	16. Герметичный барабан	Применяется для измерения расхода газа
Магнитогидродинамический	17. МГД	Используется для проводящих жидкостей, скорость до 10 м/с , точность $\pm 1\%$
Ультразвуковой	18. Датчик Доплера	Относительно дешевый, плохая точность (хуже $\pm 5\%$), полезен как индикатор потока или его отключения
	19. Время пролета	Используется для жидкостей в трубах или открытых каналах при скоростях $0.2 \dots 12 \text{ м/с}$, точность $\pm 1\%$
	20. Корреляция	Большое время реакции
Колебательный	21. Вихри в потоке	Используется и для жидкостей, и для газов при высоких давлениях и температурах, точность $\pm 1\%$
	22. Закрутка потока	Используется для жидкостей в диапазоне $6 \times 10^{-4} \dots 2 \text{ м}^3/\text{с}$, точность $\pm 1\%$
Массовый расход Прямое измерение	23. Силы Корнолиса	Используется для жидкостей и газов, точность $\pm 0.5\%$
	24. Температура	Используется для газов в диапазоне $2.5 \times 10^{-10} \dots 5 \times 10^{-3} \text{ кг/с}$
Расчетный	25. Турбинно-вибрационный элемент	Используется для жидкостей и газов
Мгновенная скорость По давлению	26. Трубка Пито	Для жидкостей или газов, точность $\pm 1 \dots 2\%$
	27. Многозаборная трубка Пито	Для жидкостей или газов, точность $\pm 1\%$
Термический	28. Анемометр с нагретой проволокой	Для газов — в диапазоне $0.1 \dots 500 \text{ м/с}$, жидкостей — в диапазоне $0.01 \dots 5 \text{ м/с}$, точность $\pm 1\%$

Расходомеры по перепаду давления

Когда жидкость течет через сужение в трубке, ее скорость возрастает, т.е. возникает прирост кинетической энергии. Для горизонтальной трубы увеличения кинетической энергии приводит к снижению потенциальной энергии давления, и, таким образом, давление в трубе будет падать. Для потоков несжимаемой жидкости, т.е. жидкостей, плотность которых не меняется при изменении давления, можно записать уравнение сохранения энергии для горизонтальной трубы:

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g},$$

где v_1 — скорость жидкости до сужения, P_1 — давление до сужения, v_2 — скорость жидкости в месте сужения, P_2 — давление в месте сужения, ρ — плотность жидкости. Это уравнение известно как **уравнение Бернулли**. Так как плотность не изменится, объем жидкости Q , проходящий через широкую секцию в секунду, должен быть равен объему, проходящему через сужение. Следовательно,

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2,$$

где A_1 — площадь поперечного сечения трубы, A_2 — площадь сужения. Отсюда видно, что:

$$Q = \frac{A_2}{\sqrt{[1 - (A_2 / A_1)^2]}} \sqrt{[2(P_1 - P_2) / \rho]}.$$

На практике это уравнение является приближенным и должно быть модифицировано при помощи корректирующего множителя C , называемого **согласующим коэффициентом**, тогда получаем:

$$Q = \frac{CA_2}{\sqrt{[1 - (A_2 / A_1)^2]}} \sqrt{[2(P_1 - P_2) / \rho]}.$$

Здесь C является функцией размера трубы, числа Рейнольдса для потока и вида устройства, используемого для измерения перепада давления. Таблицы и уравнения для расчетов, приведенные в работах (British Standards Institution, BS 1042: Section 1.1, 1981 и International Organization for Standardisation, ISO 5167, 1980), позволяют определить величины коэффициента C для конкретных конфигураций.

Массовый расход для несжимаемой жидкости равен $Q\rho$ и, таким образом:

$$\text{Массовый расход} = \frac{CA_2}{\sqrt{[1 - (A_2 / A_1)^2]}} \sqrt{[2\rho(P_1 - P_2)]}.$$

В обоих вышеприведенных уравнениях используется множитель:

$$E = \frac{1}{\sqrt{[1 - (A_2/A_1)^2]}},$$

который называется **коэффициентом сужения**. Все вышеприведенное относится к несжимаемым жидкостям. Для сжимаемых жидкостей, таких, как газы, изменение давления приводит к изменению плотности. При адиабатических процессах PV^γ является постоянной величиной, где γ — отношение удельных теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме. Таким образом,

$$\frac{P_1}{\rho_1^\gamma} = \frac{P_2}{\rho_2^\gamma},$$

где ρ_1 и ρ_2 — плотности при давлениях, соответственно равных P_1 и P_2 . Следовательно, уравнение сохранения энергии будет приведено к виду:

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{P_1}{\rho\gamma} = \frac{v_2^2}{2\gamma} + \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{P_2}{\rho g}.$$

Уравнение неразрывности массового потока при переходе от одного диаметра трубы к другому приводит к выражению:

$$\text{Массовый расход} = v_1 \rho_1 A_1 = v_2 \rho_2 A_2$$

и, таким образом:

$$\text{Массовый расход} = \frac{C \epsilon A_2}{\sqrt{[1 - (A_2/A_1)^2]}} \sqrt{[2(P_1 - P_2)/\rho]},$$

где множитель ϵ , называемый **коэффициентом сжимаемости**, задается выражением:

$$\epsilon = \left[\left(\frac{\gamma r^{2/\gamma}}{\gamma-1} \right) \left(\frac{1-r^{(\gamma-1)/\gamma}}{1-r} \right) \left(\frac{1-m^2}{1-m^2 r^{2/\gamma}} \right) \right]^{1/2},$$

где $r = P_1/P_2$ и $m = A_1/A_2$. Для несжимаемых жидкостей ϵ имеет величину, равную 1.

Существует большое разнообразие видов расходомеров, основанных на принципе измерения перепада давления, возникающего при прохождении через сужение. Все они, однако, имеют общую проблему — нелинейность соотношения между величиной расхода и измеряемого перепада давления.

1. Трубка Вентури

Трубка Вентури (Рис. 15.2) имеет постепенное коническое сужение трубы от начального диаметра. Диаметр сужения дол-

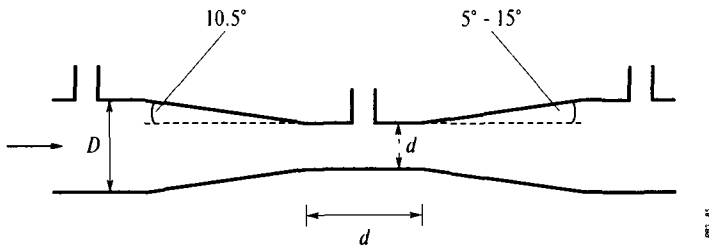


Рис. 15.2. Трубка Вентури

жен быть не менее $0.224D$ и не более чем $0.742D$, где D — начальный диаметр. Входная конусность трубы должна быть равна $10.5 \pm 1^\circ$, а выходная — $5 \dots 15^\circ$. Перепад давления в потоке до места сужения и в самом сужении может быть измерен простым U-образным манометром или мембранным манометром. Согласующий коэффициент C в этом случае будет равен приблизительно 0.99, и потери давления от введения трубки Вентури составляют $10 \dots 15\%$, т.е. незначительную величину. Прибор может применяться и для жидкостей, содержащих частицы, и для разбавленных суспензий. Он прост в работе, способен обеспечить высокую точность (может быть выше чем $\pm 0.5\%$), имеет хорошую надежность, но он дорог и имеет нелинейность зависимости объемного расхода от перепада давления.

2. Измерительная диафрагма

Измерительная диафрагма (**Рис. 15.3**) — это просто диск с отверстием, хотя существует большое разнообразие их форм. Наиболее широко применяется концентрическая форма диска с центральным круглым отверстием. В других разновидностях форма может быть эксцентрической со смещенным от центра круглым отверстием. Измерительные диафрагмы такой формы используются в тех случаях, когда в газовом потоке имеются конденсирующиеся жидкости или в потоке жидкости присутствуют нерастворенные газы. В случаях, когда в потоке жидкости присутствуют частицы, полезным может оказаться диафрагма с сегментной формой централизованного круглого отверстия. Перепад давления может быть измерен между точкой, удаленной на расстояние диаметра трубы вверх по потоку, и точкой, удаленной на половину диаметра трубы вниз по потоку от диафрагмы, или же в точках на каждой стороне диафрагмы. Такие устройства имеют согласующий коэффициент C , равный 0.6, и нелинейную зависимость объемного расхода от перепада давления. По сравнению с трубками Вентури измерительные диафрагмы являются более простыми, надежными, создают большие перепады давления (более чем в два раза), более дешевы, но и менее точны (более $\pm 1.5\%$), они дают также большие потери давления (около $50 \dots 70\%$). Если в потоке жидкости имеются твердые частицы, могут появиться проблемы, связанные с их осаждением и закупоркой отверстия.

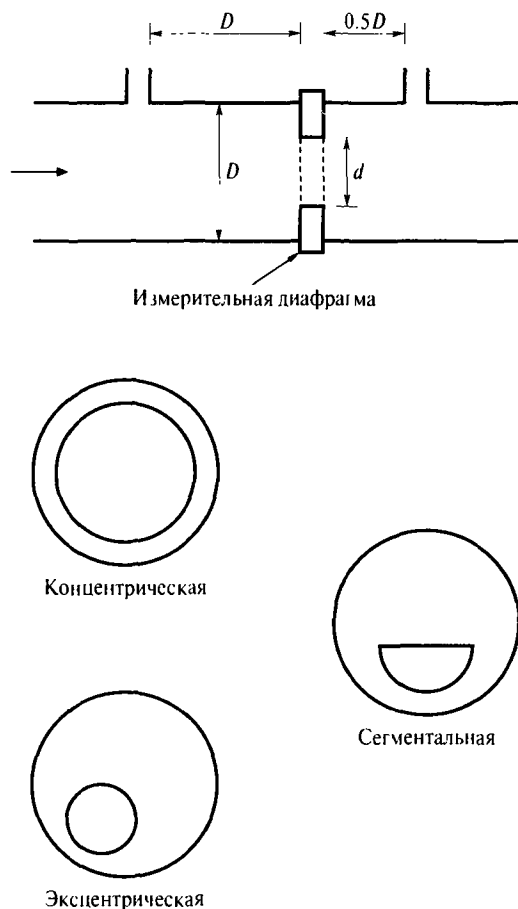


Рис. 15.3. Исмерительная диафрагма

3. Сопловой расходомер

Применяются два вида сопел: сопло Вентури и проточное сопло. Сопло Вентури (**Рис. 15.4а**) является трубкой Вентури, имеющей существенно укороченный входной конус, а у проточного сопла (**Рис. 15.4б**) входной конус еще короче. Согласующий коэффициент C для таких сопел имеет величину около 0.96. Сопла дают потери давления около 40...60%. Такие устройства дешевле трубок Вентури, дающих аналогичные перепады давления. Сопловые расходомеры имеют точность около $\pm 0.5\%$, но они также обладают нелинейной зависимостью объемного расхода от перепада давления.

4. Расходомер Далла

Это разновидность трубки Вентури, которая дает более высокий перспад давления (более чем в два раза) и меньшие потери давления (около 4...6%). Труба Далла (**Рис. 15.5**) равна по длине примерно двум ее диаметрам. Возможна и более короткая разновидность — диафрагма Далла. Труба Далла имеет согласующий коэффициент C , равный около 0.66, она часто применяется в тех случаях, где нет места для установки трубы Вентури.

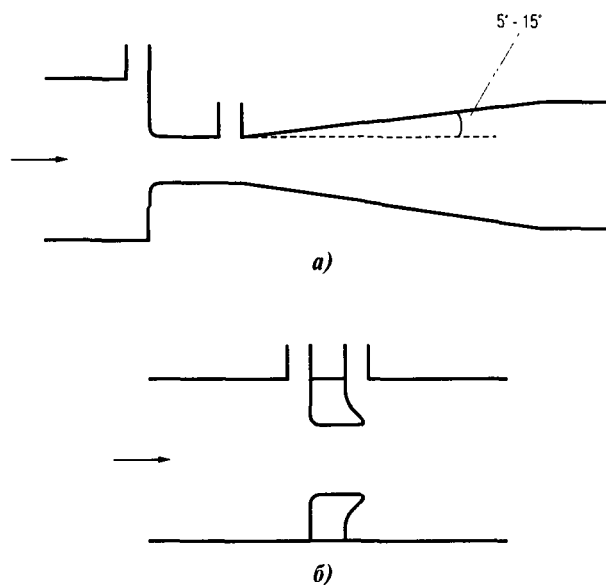


Рис. 15.4. а — сопло Вентури; б — проточное сопло

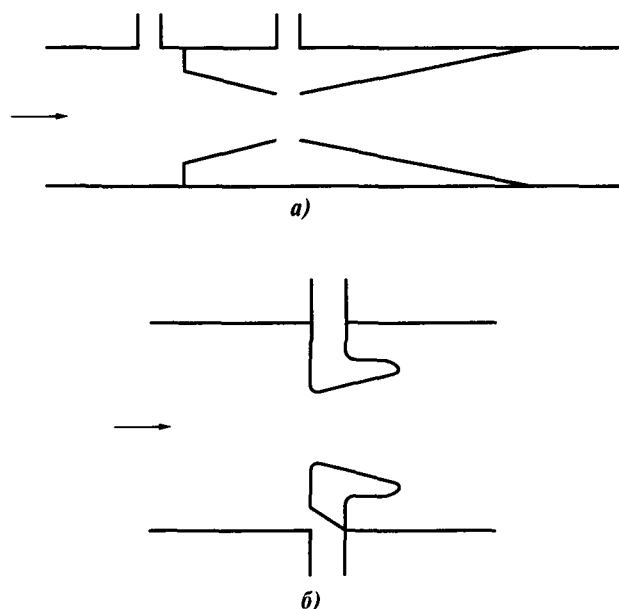


Рис. 15.5. а — труба Далла; б — диафрагма Далла

5. Расходомер с переменным сечением

Расходомеры с переменным проходным сечением предполагают поддержание постоянного перепада давления при помощи изменения площади сужения, через которое течет жидкость. Принцип действия одной из разновидностей такого расходомера аналогичен принципу измерительной диафрагмы, размер которой изменяется, обеспечивая постоянный перепад давления, поэтому такой прибор и называется *измерителем с переменным сечением*.

Самым распространенным устройством такого типа является **ротаметр** (Рис. 15.6). Он имеет поплавков в конической вертикальной трубке, в которой поток жидкости направлен вверх. Жидкость должна протекать через сужение, которое образуется зазором между поплавком и стенками трубки, где и возникает потеря давления. Так как трубка коническая, зазор между поплавком и стенками трубки увеличивается, когда поплавок перемещается вверх по трубке. При этом перепад давления уменьшается. Поплавок движется вверх по трубке до тех пор, пока давление жидкости станет уравновешивать вес поплавка. Большой расход жидкости создает большой перепад давления при конкретном зазоре и, таким образом, поплавок вновь перемещается вверх по трубке на высоту, которая определяется расходом в потоке. Шкала на боковой стенке трубки может быть проградуирована таким образом, чтобы было возможно непосредственно считывать величину расхода жидкости, соответствующую конкретной высоте поплавка. Ротаметр является дешевым и надежным прибором, который имеет точность около $\pm 1\%$ и может использоваться для измерения скоростей потоков в диапазоне $30 \times 10^{-6} \dots 1 \text{ м}^3/\text{с}$.

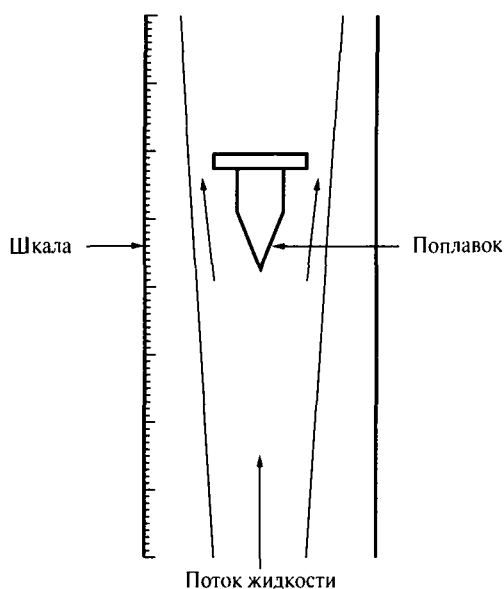


Рис. 15.6. Ротаметр

6. Расходомер с переменным проходным сечением

Диафрагменные расходомеры дают нелинейную связь между перепадом давления и расходом. Линейная зависимость может быть получена при помощи изменения площади проходного сечения. На Рис. 15.7 показаны две разновидности таких устройств: (а) — для измерения малых расходов; (б) — для измерения больших расходов. В обоих случаях поток жидкости заставляет конус дви-

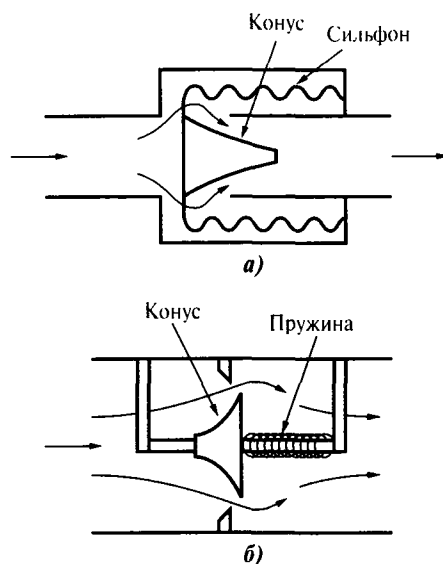


Рис. 15.7. Расходомер с переменным проходным сечением:
 а — для малых расходов; б — для больших расходов

гаться вдоль оси и таким образом изменять проходное сечение отверстия. В первом случае конус движется против силы, создаваемой сильфоном, а во втором — пружиной. В варианте малых расходов диапазон измерений до $0.05 \text{ м}^3/\text{с}$, в варианте больших расходов — до $3 \text{ м}^3/\text{с}$. Эти устройства могут применяться при давлении до $2 \times 10^7 \text{ Па}$ и при температуре до 500°C . Расходомеры с переменным сечением часто применяются для измерения потоков пара.

Механические расходомеры

7. Мишенный расходомер

В расходомерах такого типа (**Рис. 15.8**) жидкость ударяется о мишень — диск, и, следовательно, мишень подвергается действию силы. Эта сила через рычаг приводит в движение заслонку соплового устройства пневматической системы. Результирующее изменение давления в пневматической системе является мерой силы и частично используется для поддержания рычага с мишенью при помощи сильфона вблизи их невозмущенного положения. Таким образом, имеет место баланс сил на рычаге за счет давления воздуха в сильфоне. Такие расходомеры имеют диапазон измерения до $0.03 \text{ м}^3/\text{с}$ при точности порядка $\pm 0.5\%$ и могут применяться как для жидкостей, так и для газов. Они могут использоваться на вязких и загрязненных жидкостях.

Масса жидкости, ударяющаяся о мишень в секунду, равна ρAv , где ρ — плотность жидкости, A — площадь мишени, v — скорость жидкости. Эта жидкость обладает количеством движения, равным $(\rho Av) v$, и, следовательно, изменение его в се-

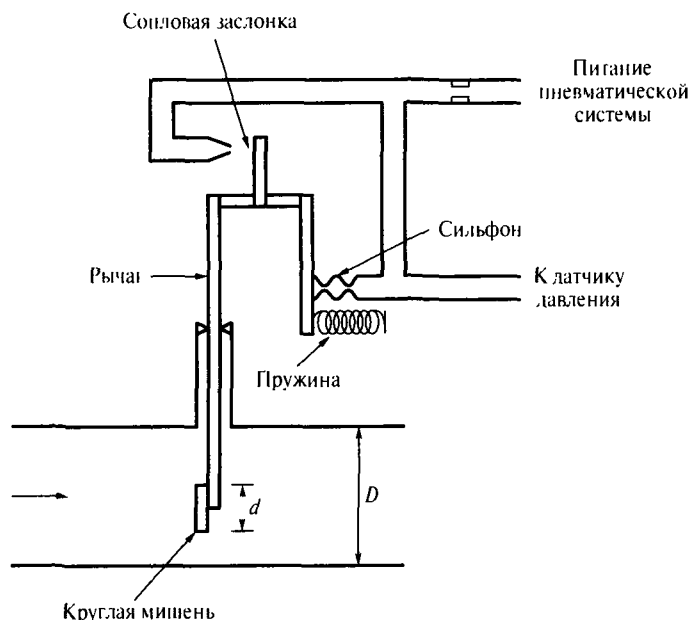


Рис. 15.8. Мишенный расходомер

кунду равно $\rho A v^2$. Сила, действующая на диск, будет равна скорости изменения этого момента количества движения, т.е.:

$$F = \rho A v^2.$$

Если d равно диаметру мишени, то:

$$F = \rho (\pi d^2 / 4) v^2.$$

Жидкость протекает мимо мишени через кольцевой зазор площадью $\pi(D^2 - d^2)/4$, где D — диаметр трубы. Количество жидкости Q , протекающее в секунду через это пространство, равно:

$$Q = [\pi(D^2 - d^2) / 4] v.$$

Следовательно:

$$Q = \sqrt{(\pi/4)[(D^2 - d^2)/d]} \sqrt{(F/\rho)} = C[(D^2 - d^2)/d] \sqrt{(F/\rho)},$$

где C — постоянная величина. Так как сила уравнивается давлением в сильфоне, расход будет пропорционален квадратному корню от давления в нем.

8. Турбинный расходомер

Турбинный расходомер (**Рис. 15.9**) состоит из многолопастного ротора, удерживаемого по центру трубы, в которой течет жидкость. Под действием потока жидкости ротор приводится во вращение, при этом угловая скорость будет прямо пропорцио-

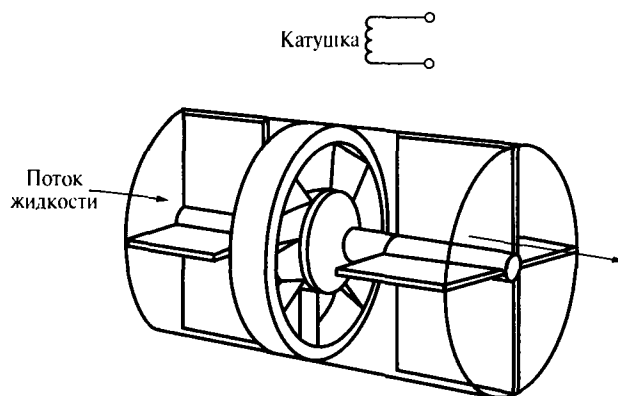


Рис. 15.9. Турбинный расходомер

нальна расходу. Скорость вращения ротора может быть определена при помощи электромагнитного датчика. Это может быть датчик, использующий принцип переменного магнитного сопротивления, с лопастями, выполненными из ферромагнитного материала. Каждый раз, когда лопасти проходят вблизи катушки, возникает изменение магнитного сопротивления. Этот измеритель достаточно дорогой. Он вносит некоторое сопротивление в поток жидкости, легко повреждается твердыми частицами, попавшими в поток. Турбинные расходомеры имеют хорошую воспроизводимость, их точность составляет около $\pm 0.3\%$. Диапазон измерений — до $1 \text{ м}^3/\text{с}$. Турбинные расходомеры могут применяться и для жидкостей, и для газов.

9. Расходомер с вращающимися лопастями

Жидкость ударяет тангенциально по лопастям, прикрепленным к ротору (**Рис. 15.10**). Вращение ротора регистрируется соответствующей системой или передается шестеренчатым приводом к регистратору. Это устройство может применяться для малых расходов жидкости. Подобные системы могут использоваться и для газов. В этом случае они известны как анемометры.

Расходомеры вытеснительного типа

В расходомерах такого типа поток жидкости заполняет известный объем, а затем для определения величины суммарного количества жидкости, проходящего через измеритель, подсчитывается общее количество таких объемов. Если объем протекающей жидкости будет измеряться в течение известного промежутка времени, то можно определить объемный расход жидкости. Расходомеры такого типа широко применяются для измерения расхода воды, газа, а также при измерении объема топлива, проходящего через топливные насосы.

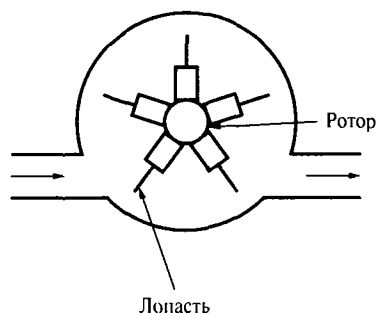


Рис. 15.10. Расходомер с вращающимися лопастями

10. Расходомер с вращающимся плунжером

Измеритель расхода с вращающимся плунжером (**Рис. 15.11**) состоит из цилиндрической рабочей камеры, в которой вращается эксцентрично расположенный полый цилиндрический плунжер. Жидкость захватывается вращающимся плунжером и влечется по кругу до выходного отверстия. Количество оборотов оси плунжера определяет объем жидкости, прошедшей через расходомер. Устройство данного типа широко применяется для измерения потребления бытовой воды. Точность около $\pm 1\%$.

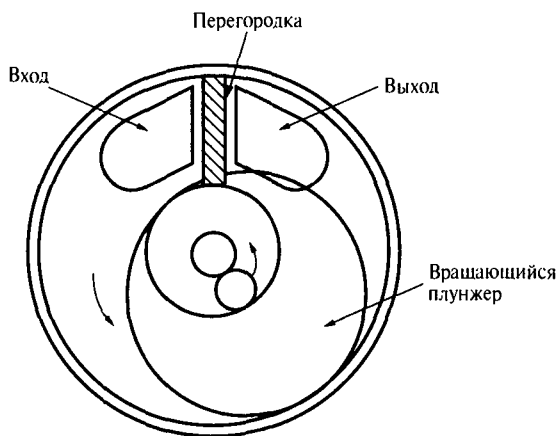


Рис. 15.11. Расходомер с вращающимся плунжером

11. Поршневой расходомер

Этот измеритель (**Рис. 15.12**) имеет поршень, который приводится в движение поступающей жидкостью, заполняющей камеру, когда поршень занимает свое максимально выдвинутое положение. Когда это положение достигается, скользящий клапан реверсирует движение поршня, направляя жидкость с другой его стороны. Ранее попавшая в камеру жидкость вытесняется через выходное отверстие. Храповик, соединенный со штоком поршня, используется для привода счетчика. Устройство применяется для жидкостей. Оно очень точное ($\pm 0.1\%$) и может работать в очень широком диапазоне измерений.

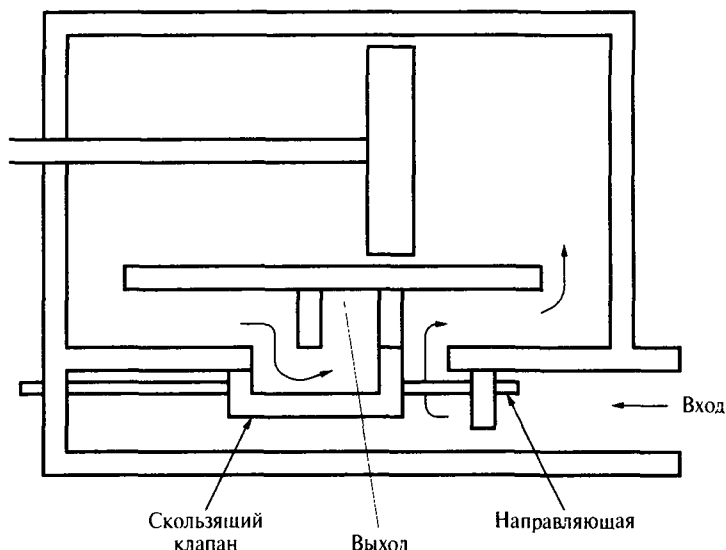


Рис. 15.12. Поршневой расходомер

12. Расходомер с качающимся диском

В расходомерах этого типа действие качающегося диска аналогично действию поршня в измерителях, описанных в предыдущем разделе (**Рис. 15.13**). Входящий поток сначала заставляет диск наклониться в правую сторону, что приводит к заполнению камеры. После этого поток жидкости поступает в камеру с другой стороны, и диск, соответственно, наклоняется уже в левую сторону. В результате этого жидкость, уже находящаяся в камере, начинает вытесняться через выходное отверстие. Такое движение диска заставляет вал, выходящий из сферы, на которой смонтирован сам диск, перемещаться по круговой траекто-

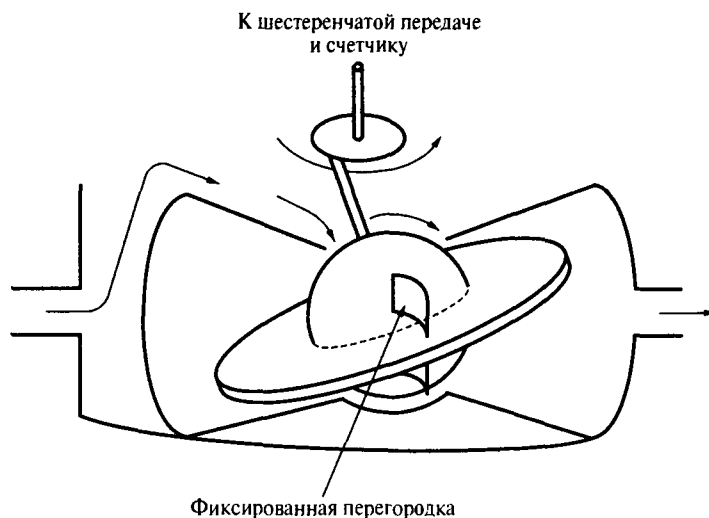


Рис. 15.13. Расходомер с качающимся диском

рии и приводить в движение шестеренчатую передачу. Такие измерители используются для измерения расхода жидкости с точностью $\pm 1\%$.

13. Расходомер с вращающимся импеллером

На **Рис. 15.14** показан вариант расходомера с вращающимся импеллером, используемый для жидкостей. На **Рис. 15.15** приведен вариант для газов. В обеих разновидностях таких расходомеров используются два ротора. Поток жидкости заставляет их вращаться. При каждом обороте вращения роторов захватывается определенный объем жидкости, которая перемещается от входного отверстия к выходному. Счетчик приводится в движение вращением ротора. Вариант с фигурным ротором часто используется для измерения расхода масел до $1 \text{ м}^3/\text{с}$ при давлении до 80 бар. Кулачковый расходомер может работать с газами при расходах $0.003 \dots 3 \text{ м}^3/\text{с}$ с точностью порядка $\pm 1\%$.

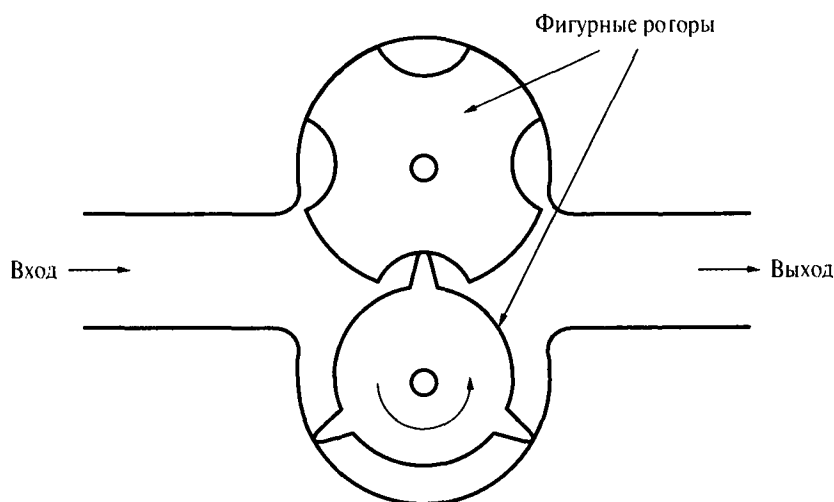


Рис. 15.14. Расходомер с фигурным ротором

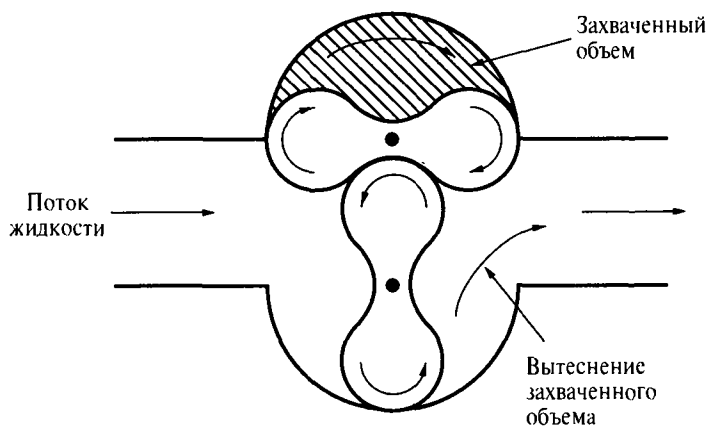


Рис. 15.15. Расходомер с вращающимися кулачками

14. Расходомер с вращающимися лопастями вытеснительного типа

Расходомер с вращающимися лопастями вытеснительного типа (Рис. 15.16) состоит из цилиндрического ротора, из которого выступают четыре втягивающиеся лопасти. Поток жидкости приводит ротор во вращение. При вращении ротора жидкость захватывается между лопастями крыльчатки и перемещается по кругу к выходному отверстию камеры. Количество оборотов ротора, таким образом, является мерой количества жидкости, прошедшей через расходомер. Устройство обладает высокой точностью, около $\pm 0.1\%$. Оно широко используется для измерения расходов масел и топлива.

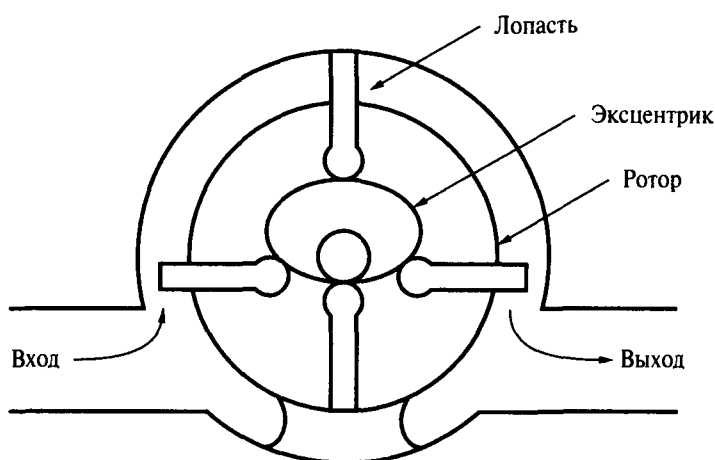


Рис. 15.16. Расходомер с вращающимися лопастями вытеснительного типа

15. Диафрагменный расходомер

На Рис. 15.17 показан один из вариантов диафрагменного расходомера. Он имеет четыре камеры: *A*, *B*, *C*, *D*, которые могут быть пустыми или заполненными газом. Для случая, показанного на рисунке, полость *A* опорожняется, *B* — заполняется, *C* — пустая, *D* — только что заполнена. Затем следует движение скользящего клапана вправо для того, чтобы перекрыть входы в камеры *A* и *B* и открыть входы в *C* и *D*. Теперь полость *A* — пустая, *B* — полная, *C* — заполняется, *D* — опорожняется. Клапан продолжает двигаться вправо и открывает камеры *A* и *B*, закрывая при этом *C* и *D*. Тогда *A* — заполняется, *B* — опорожняется, *C* — полная, *D* — пустая. Скользящий клапан начинает двигаться влево, чтобы закрыть *A* и *B* и открыть *C* и *D*. Тогда *A* — заполнена, *B* — опорожнена, *C* — опорожняется, *D* — заполняется. Указанная последовательность операций повторяется. Это устройство применяется для измерения потребления бытового газа.

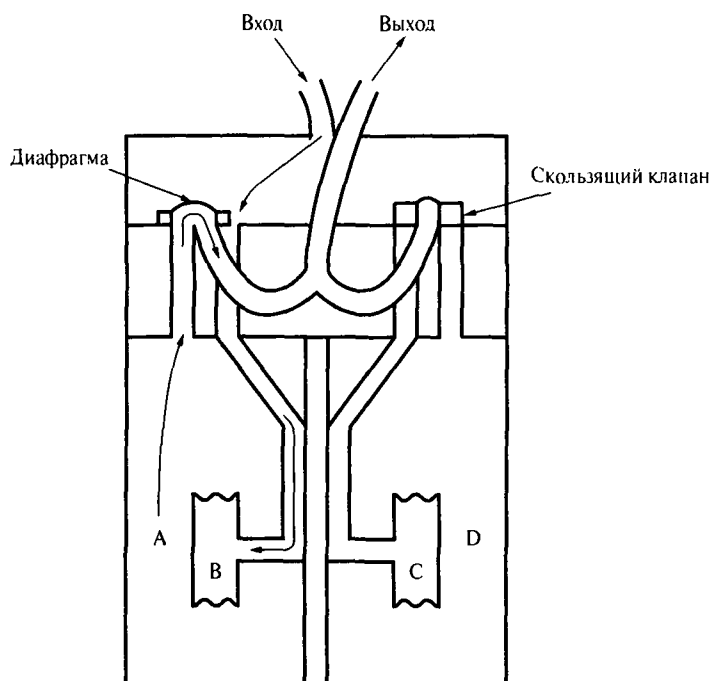


Рис. 15.17. *Диафрагменный расходомер*

16. Барабанный расходомер

Такое устройство используется для измерения расхода газа. Газ входит в герметичный барабан (**Рис. 15.18**) через центральное перекрываемое отверстие. Газ удерживается между профилированными листовыми перегородками и жидкостью до тех пор, пока полость полностью не освободится от жидкости. Затем захваченный объем газа истекает через выхлопное отверстие.

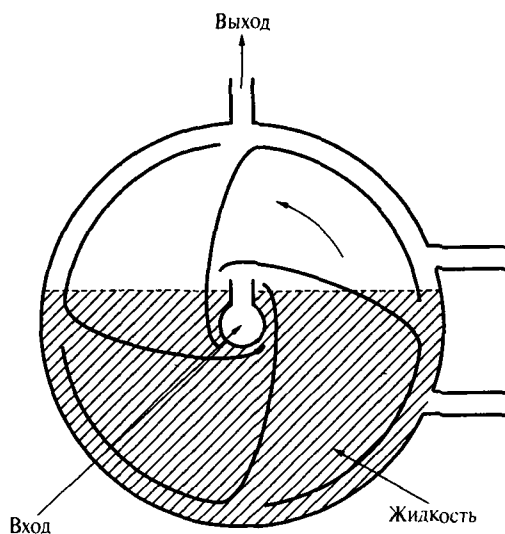


Рис. 15.18. *Барабанный расходомер*

Магнитогидродинамические расходомеры

Если проводник длиной L движется со скоростью v под прямым углом к магнитному полю с индукцией B (Рис. 15.19), то между концами проводника возникает э.д.с. E , равная:

$$E = BLv.$$

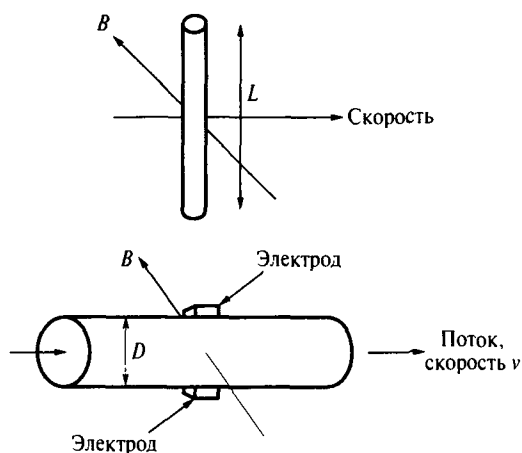


Рис. 15.19. Проводник,двигающийся в магнитном поле

Таким образом, если проводящая жидкость движется со средней скоростью v через трубу, которая расположена под прямым углом к магнитному полю с индукцией B , то между двумя электродами, расположенными на противоположных стенках трубы, возникает э.д.с. E . Длиной L проводника здесь является диаметр трубы D . Следовательно:

$$E = BDv.$$

Так как величина расхода Q есть $\left(\frac{1}{4}\pi D^2\right)v$, то:

$$E = \frac{4BQ}{\pi D}.$$

17. Магнитогидродинамический расходомер

Магнитное поле создается парой катушек, расположенных на противоположных сторонах трубы, по которой течет жидкость. Если для питания этих катушек применяется постоянный ток, то вблизи электродов образуются пузырьки газа (эффект называется поляризацией), а также происходят другие электрохимические и термохимические процессы. Эти проблемы можно преодолеть, используя пульсирующий постоянный ток (переменный ток не используется, так как может приводить к интерференционным

явлениям с основной частотой). Обычно постоянный ток включается и выключается со скоростью около трех раз в секунду. Во время каждого цикла наведенная э.д.с. измеряется на электродах пять раз. При использовании микропроцессора эти сигналы могут быть проанализированы. Информация, обусловленная потоком, освобождается от наводок и выделяется. Такие расходомеры могут использоваться с широким набором жидкостей, обладающих электропроводностью более 1 мкСименс/см. Они могут применяться на грязных жидкостях и суспензиях. Такие расходомеры нечувствительны к изменениям температуры, давления, вязкости, плотности и проводимости. Диапазон измеряемых скоростей до 10 м/с при использовании труб диаметром 32...1200 мм. Точность этих расходомеров составляет порядка $\pm 1\%$.

Ультразвуковые расходомеры

18. Доплеровский расходомер

На Рис. 15.20 показан принцип действия Доплеровского расходомера. Излучатель посылает ультразвуковую волну с частотой f и скоростью c ее распространения в жидкости. Она отражается от пузырьков, частиц или маленьких вихрей в жидкости, которые движутся со скоростью потока v . Скорость ультразвуковой волны относительно таких частиц равна $(c + v \cos \theta)$, и, таким образом, видимая частота будет равна $(c + v \cos \theta)f/c$. Частицы, отражающие ультразвуковые волны, действуют как передатчик, движущийся со скоростью v относительно приемника. Скорость этих волн относительно приемника равна $(c - v \cos \theta)$, а их видимая частота определяется выражением:

$$[c/(c - v \cos \theta)][(c + v \cos \theta)f/c].$$

Таким образом:

$$\text{Принципаемая частота} = \frac{f(c + v \cos \theta)}{(c - v \cos \theta)}.$$

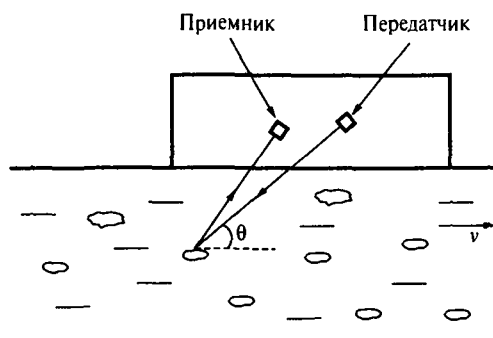


Рис. 15.20. Доплеровский расходомер

Величина v/c относительно мала, так что вторыми и более высокими ее степенями можно пренебречь. Тогда выражение упрощается:

$$\text{Принимаемая частота} - \text{излучаемая частота } f = \frac{2fv}{c} \cos \theta.$$

Разность частот здесь пропорциональна скорости потока и, следовательно, также объемному расходу.

Ультразвуковые расходомеры относительно дешевые. Их точность в лучшем случае достигает $\pm 5\%$. Поэтому такие устройства чаще используются просто для индикации потока или его появления.

19. Времяпролетный расходомер

Прибор состоит из пары ультразвуковых приемопередатчиков по одному с каждой стороны трубы, через которую протекает жидкость (Рис. 15.21). Скорость ультразвуковой волны в одном направлении равна $(c + v \cos \theta)$, а в другом направлении — $(c - v \cos \theta)$, где c — скорость звука в покоящейся жидкости. Время, необходимое для прохода ультразвукового импульса в одном направлении, равно $L/(c + v \cos \theta)$, а в другом направлении — $L/(c - v \cos \theta)$. Если приход импульса использовать для включения передачи следующего импульса, то частота, с которой эти импульсы излучаются в каждом направлении, будет равна $(c + v \cos \theta)/L$ и $(c - v \cos \theta)/L$. Разницу этих частот, таким образом, можно определить как:

$$\text{Разность частот} = \frac{(c + v \cos \theta)}{L} - \frac{(c - v \cos \theta)}{L} = \frac{2v \cos \theta}{L}.$$

Эта величина и используется для определения скорости потока жидкости.

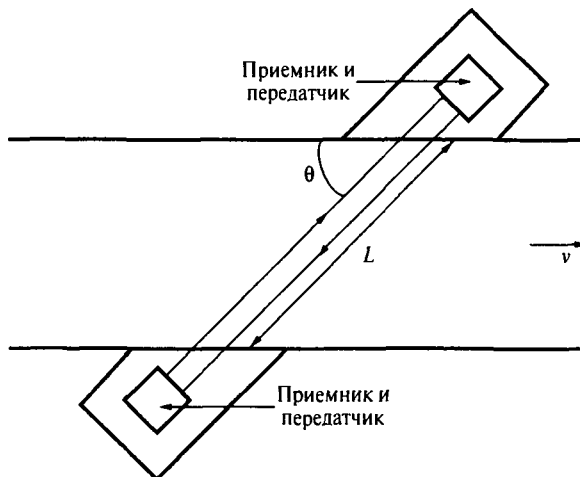


Рис. 15.21. Времяпролетный расходомер

Времяпролетный расходомер может применяться для труб диаметром 75...1500 мм. Диапазон измеряемых скоростей 0.2 ...12 м/с при точности порядка $\pm 1\%$. Такое устройство используется для измерения скорости потоков открытых каналов и рек.

20. Корреляционный расходомер

Этот метод предполагает, что в потоке жидкости существуют случайные флуктуации, такие как турбулентность, пузырьки или частицы. На **Рис. 15.22** показан вариант такого прибора, когда средством определения флуктуаций является ультразвук. Любые флуктуации, проходя между излучателем и приемником, воздействуют на принимаемый сигнал, изменяя его амплитуду и фазу. Сигналы, принимаемые двумя приемниками, после усиления и фильтрации поступают на коррелятор. Последний вычисляет взаимнокорреляционную функцию двух сигналов. Корреляционная функция максимальна, когда имеется максимальное подобие между двумя сигналами. Определяется разница времени t между приемом этих двух сильно коррелирующих сигналов, и после этого определяется скорость потока v , $v = L/t$. Проблемой для таких систем является большая инерционность.

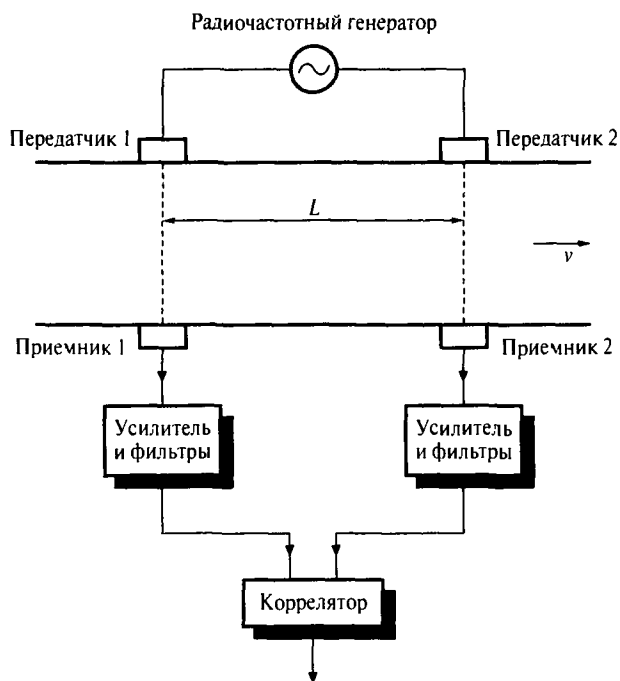


Рис. 15.22. Корреляционный расходомер

Колебательные расходомеры

21. Вихревой расходомер

Когда поток жидкости обтекает тело, слои жидкости, прилегающие к поверхности тела, замедляются. Для обтекаемого тела эти пограничные слои следуют за контуром тела до места их встречи за объектом. В этом случае в потоке возникают небольшие возмущения. Для плохо обтекаемых тел пограничные слои отрываются от тела намного раньше и создают большие возмущения в потоке. Когда пограничный слой отходит от поверхности тела, он закручивается в вихри. Они генерируются попеременно с верхней и нижней поверхности тела (**Рис. 15.23**). В результате возникают два параллельных ряда вихрей, движущихся вниз по потоку с одинаковым расстоянием между вихрями в каждом ряду. Вихри в одном ряду оказываются посередине между вихрями другого ряда. Количество вихрей, генерируемое в секунду f от каждой стороны поверхности плохо обтекаемого тела, можно определить как:

$$f = \frac{Sv_b}{d},$$

где v_b — средняя скорость жидкости вблизи плохо обтекаемого тела, S — фактически постоянная величина, называемая **числом Струхали**. Поток жидкости у тела протекает через площадь, равную $\pi D^2/4 - Dd$, где D — диаметр трубы. Предполагается, что тело имеет прямоугольную поверхность поперечного сечения шириной d , расположенную в диаметральной плоскости трубы, и его эффективная площадь равна примерно Dd . Скорость v_b в этом месте определяется скоростью v на некотором удалении от тела, и объемный расход Q может быть определен как:

$$Q = (\pi D^2/4)v = (\pi D^2/4 - Dd)v_b.$$

Следовательно:

$$f = \frac{SD^2v}{\pi D^2 - Dd} = \frac{SD^2Q}{(\pi D^2/4)(\pi D^2/4 - Dd)} = \frac{4SQ}{\pi D^2 d [1 - (4d/\pi D)]}.$$

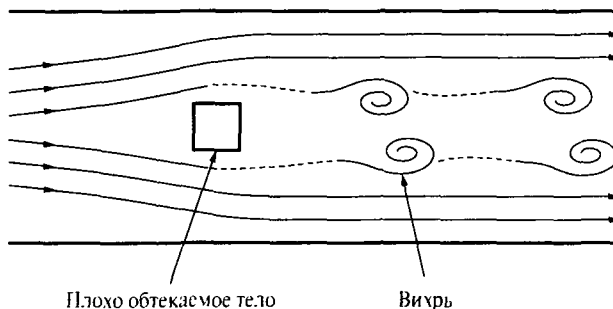


Рис. 15.23. Образование вихрей

Из-за различной формы плохо обтекаемых тел (**Рис. 15.24**) это уравнение видоизменяется введением коэффициента обтекаемости k , величина которого определяется конкретной формой тела.

$$f = \frac{4SQ}{\pi D^2 d [1 - (4dk / \pi D)]}.$$

Таким образом, для любого плохо обтекаемого тела частота генерируемых вихрей прямо пропорциональна расходу жидкости.

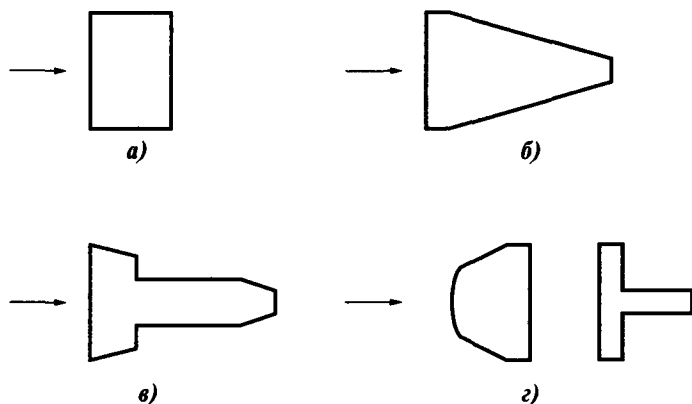


Рис. 15.24. Формы плохо обтекаемых тел

Имеется много методов для измерения частоты вихрей (**Рис. 15.25**). Например, термистор может быть размещен на передней поверхности плохо обтекаемого тела (**Рис. 15. 25а**). Термистор, нагретый протекающим через него током, чувствует вихри благодаря эффекту охлаждения при контакте с ними, что создает изменение сопротивления термистора. В другом методе вихри оказывают воздействие на луч ультразвуковой волны (**Рис. 15. 25б**). Полученное в результате изменение амплитуды этой волны может быть зафиксировано. Еще одним вариантом такого детектора является пьезоэлектрический кристалл, смонтированный в плохо обтекаемом теле (**Рис. 15. 25в**). Упругая диафрагма реагирует на возмущения давления, генерируемые вихрями, и они воспринимаются пьезоэлектрическим кристаллом. Существует разновидность системы с пьезоэлектрическим датчиком, вмонтированным во второе плохо обтекаемое тело, расположенное ниже по потоку по отношению к первому (**Рис. 15.24г**).

Вихревые расходомеры применяются и для жидкостей, и для газов. Они не чувствительны к изменениям плотности, температуры или давления, имеют точность $\pm 1\%$ и используются при давлении до 10 МПа и температуре до 200°C.

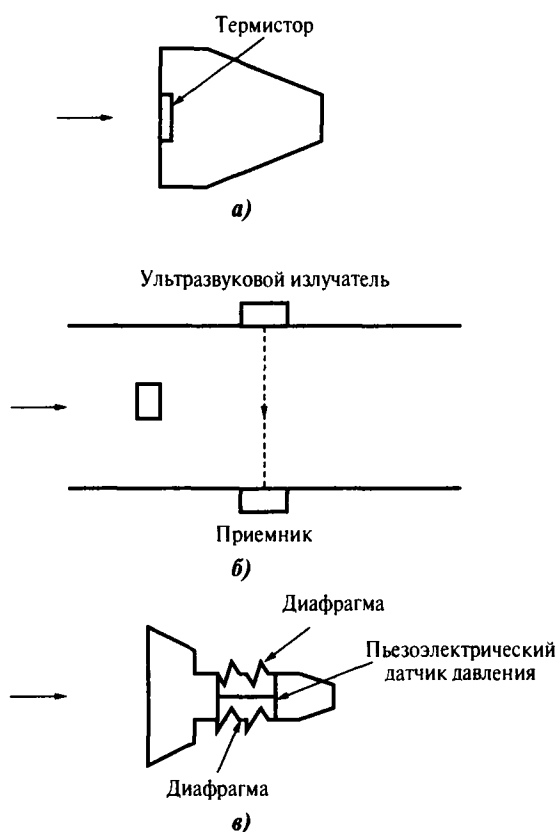


Рис. 15.25. Системы детектирования вихрей

22. Расходомер с закруткой потока

В этом измерителе (Рис. 15.26) жидкость закручивается при прохождении изогнутых лопастей. Колебания этой закрученной жидкости детектируются температурным датчиком. Это может быть термистор, который нагревается проходящим через него током. По потере тепла на термисторе можно судить о прохождении через него вихря. Это приводит к тому, что температура термистора и, следовательно, его сопротивление будут колебаться с той же

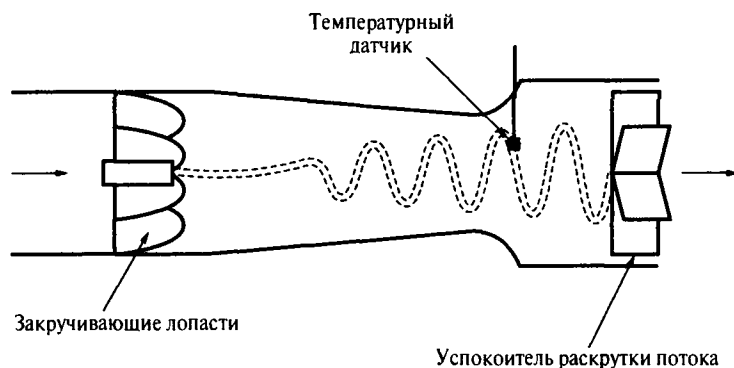


Рис. 15.26. Расходомеры с закруткой потока

частотой, с какой появляются вихри. Эта частота пропорциональна величине расхода потока. Метод закрутки применяется для измерения расхода жидкостей в диапазоне $6 \times 10^{-4} \dots 2 \text{ м}^3/\text{с}$ и расхода газов в диапазоне $10^{-3} \dots 3 \text{ м}^3/\text{с}$. Точность метода составляет около $\pm 1\%$.

Прямые измерения массовых расходов

23. Кориолисовский измеритель массового расхода

На тело массой M , движущееся с постоянной линейной скоростью v и одновременно вращающееся с угловой скоростью ω , действует сила инерции, направленная под прямым углом к направлению движения, известная как *сила Кориолиса* (Рис. 15.27).

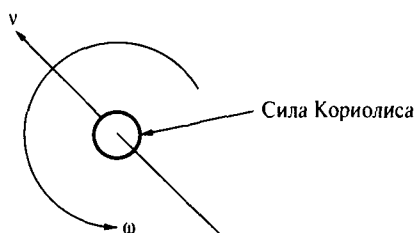


Рис. 15.27. Сила Кориолиса

$$\text{Сила Кориолиса} = 2M\omega v.$$

Основной элемент Кориолисовского измерителя массового расхода — это С-образная трубка (Рис. 15.28), через которую протекает жидкость. На трубку и жидкость внутри нее действует угловое ускорение от вибраций, создаваемых магнитом, смонтированным на закругленной части трубки, и катушки, укрепленной на конце Т-образной рессоры. Колебания рессоры приводят трубку в колебательный режим. Угловое ускорение при этом постоянно меняет направление. В то же самое время сила Кориолиса действует на жидкость в верхней ветви трубки в одном направлении, а в нижней ветви — в противоположном направлении. Это происходит потому, что направления потока жидкости противоположны в верхней и нижней ветвях. Результирующие силы Кориолиса на жидкость в двух ветвях, таким образом, противоположны по направлению и приводят ветви к смещению. Когда направление угловой скорости меняется, эти силы также меняют направление и ветви смещаются в противоположную сторону. Величина этих смещений пропорциональна массовому расходу жидкости через трубу. Смещения регистрируются при помощи оптических преобразователей. Их выходной сигнал представляет собой импульс, длительность которого пропорциональна расходу жидкости. Кориолисовские расходомеры могут применяться как для жидкостей, так и для газов, выдавая измерение с точностью $\pm 0.5\%$. Они не чувствительны к изменениям температуры и давления.

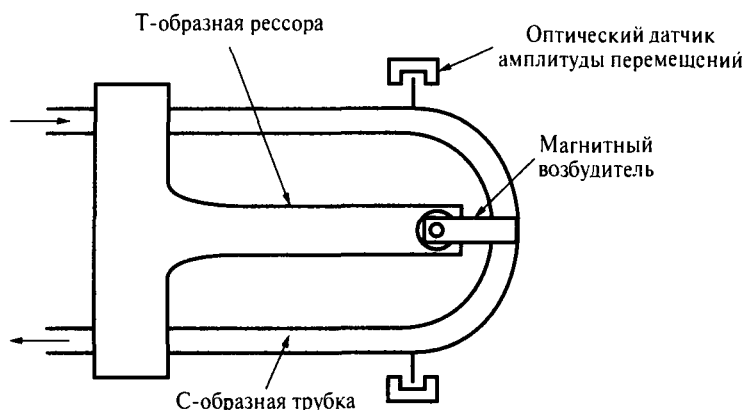


Рис. 15.28. Кориолисовский расходомер

Дополнительная литература: для изучения сил Кориолиса смотрите разделы по динамике в книге Hibbeler R.C. (1985), *Mechanics for Engineers*, Macmillan; для ознакомления с расходомерами смотрите книгу Loxton R. and Pope R.(eds) (1986), *Instrumentation: A Reader*, Open University Press.

24. Термический массовый расходомер

Этот расходомер состоит из двух температурных датчиков, один из которых смонтирован выше по потоку, а другой — ниже по потоку по отношению к нагревателю (Рис. 15.29). Разница температур между этими датчиками зависит от массового расхода. Два датчика включены в соседние плечи моста Уитстона. Разница потенциалов разбаланса моста является мерой разности температур и, следовательно, массового расхода жидкости. Такие приборы применяются для измерения газовых потоков в диапазоне 2.5×10^{-10} г/с... 5×10^{-3} кг/с с точностью $\pm 1\%$.

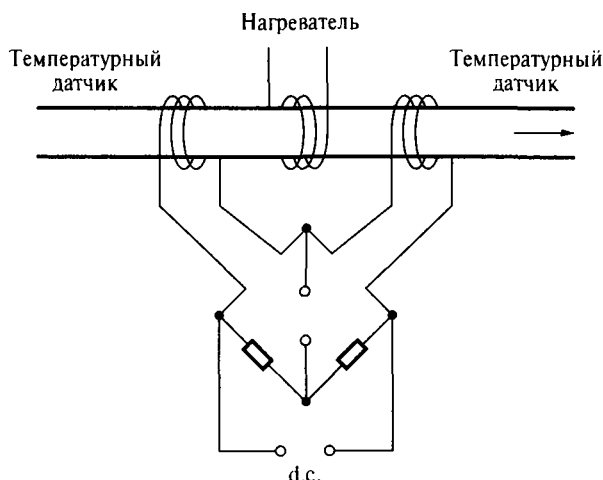


Рис. 15.29. Термический массовый расходомер

Косвенные методы определения массового расхода

Косвенные методы измерения массового расхода основаны на определении объемного расхода и плотности жидкости в отдельных измерениях и последующем вычислении по их результатам массового расхода. В случае чистых жидкостей плотность определяется только по температуре. Если температура в разумных пределах постоянна, то плотность также можно считать постоянной. Тогда определение объемного расхода сразу дает измерение массового расхода. Для газов и негомогенных жидкостей требуется определять и объемный расход, и плотность.

25. Турбинно-вибрационный массовый расходомер

Турбинный расходомер (см. выше в этой главе) применяется для получения частотного выходного сигнала, пропорционального величине скорости потока. Вибрационный датчик плотности (см. главу 12) используется для того, чтобы получить частотный выходной сигнал, связанный с плотностью жидкости. Эти два сигнала могут быть скомбинированы компьютерной программой, чтобы выдать на выходе массовый расход. Данный метод может быть использован для жидкостей и газов.

Измерение мгновенной скорости потока по перепаду давления

26. Статическая трубка Пито

Для статической трубки Пито (Рис. 15.30) производится измерение перепада давления между точкой потока жидкости в зоне динамического давления P_1 и точкой в зоне статического давления P_s . Перепад давления создается за счет кинетической энергии жидкости. Следовательно, здесь может быть применено уравнение сохранения энергии (Закон Бернулли см. выше в этой главе):

$$\frac{P_1}{\rho} = \frac{P_s}{\rho} + \frac{v^2}{2},$$

где ρ — плотность жидкости, v — ее скорость в зоне динамического давления. Следовательно:

$$v = \sqrt{\left[\frac{2(P_1 - P_s)}{\rho} \right]}.$$

Это соотношение применимо для несжимаемых жидкостей. Для сжимаемых жидкостей, таких как газ, соотношение необходимо модифицировать. Это связано с тем, что плотность в динамической и статической зонах ρ_1 и ρ_s будет неодинакова. В этом случае уравнение преобразуется к виду:

$$\frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{P_1}{\rho_1} = \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{P_s}{\rho_s} + \frac{v^2}{2}.$$

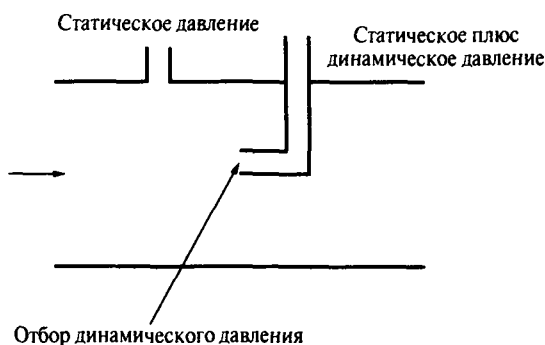


Рис. 15.30. Статическая трубка Пито

Считая, что изменения плотности являются адиабатическими, т.е.:

$$\frac{P_1}{\rho_1^\gamma} = \frac{P_s}{\rho_s^\gamma},$$

получаем:

$$v = \sqrt{\left[2 \frac{\gamma}{\gamma-1} \frac{P_s}{\rho_s} \left\{ \left(\frac{P_1}{P_s} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1 \right\} \right]}.$$

Для воздуха различие плотности между статическим и динамическим отверстиями отбора пренебрежимо мало при скоростях, меньших 100 м/с, и здесь применимо уравнение для несжимаемых жидкостей.

Перепад давления часто измеряется датчиками давления дифференциального типа. Они могут использоваться и для газов, и для жидкостей и имеют точность около 1...2%. Проблемой для статических трубок Пито является то, что отборное отверстие легко засоряется. Поэтому они применяются чаще для газов, чем для жидкостей.

27. Многозаборная трубка

Это разновидность трубки Пито с четырьмя отверстиями отбора динамического давления (**Рис. 15.31**). Располагают отверстия таким образом, чтобы каждое получало давление от равных кольцевых сегментов потока. Среднее давление от этих четырех отборников характеризует внутренний поток. Статическое давление получают от отборника позади динамической трубки. Этот прибор дает точность порядка $\pm 1\%$.

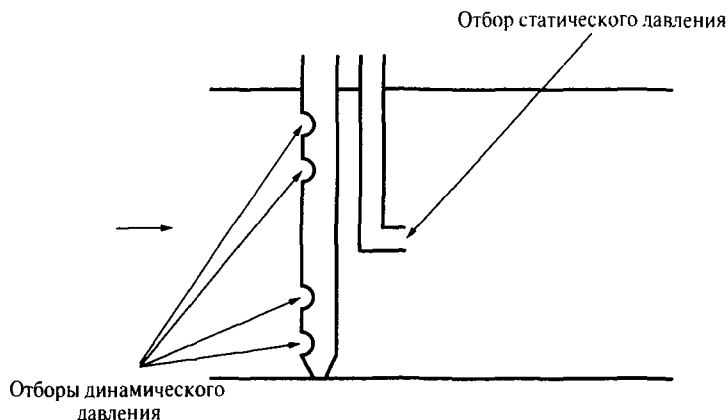


Рис. 15.31. Многозаборная трубка

Термические методы измерения мгновенной скорости потока

28. Анемометр с нагретой проволокой

Анемометр с нагретой проволокой состоит из небольшого проволочного сопротивления, помещенного в поток (**Рис. 15.32**). Прохождение электрического тока через проволочку приводит к подъему ее температуры до величины, которая определяется скоростью ее теплопотерь. Последние зависят от скорости потока жидкости. В равновесном состоянии справедливо:

$$i^2 R = hA(T_s - T_f),$$

где i — ток через датчик, R — сопротивление датчика, A — эффективная поверхность, T_s — температура датчика, T_f — температура жидкости. Коэффициент теплопередачи h зависит от скорости v жидкости.

$$h = C_0 + C_1 \sqrt{v},$$

где C_0 и C_1 — константы. Таким образом:

$$i^2 R = A(C_0 + C_1 \sqrt{v})(T_s - T_f).$$

Обычно сопротивление, а, следовательно, и температура чувствительного элемента поддерживаются на постоянном уровне за счет регулирования тока. В этом случае по величине изменения тока определяют скорость потока жидкости:

$$i^2 = C_2 + C_3 \sqrt{v},$$

где C_2 и C_3 — постоянные величины. Нагреваемый проволочный анемометр применяется для измерения потоков газов со скоростью 0.1...500 м/с и температурой до 750°C. Соответству-

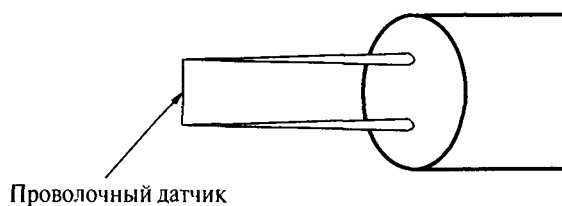


Рис. 15.32. Анемометр с нагретой проволокой

ющий диапазон измерения для жидкостей $0.01 \dots 5$ м/с. Для жидкостей предпочтительнее использовать тонкопленочные датчики на поверхности круглого цилиндра, имеющие диапазон измерения $0.01 \dots 25$ м/с с точностью $\pm 1\%$.

Тарировка расходомеров любых типов

Общими методами, используемыми для тарировки расходомеров для жидкостей или газов, являются:

- измерение массы вещества, прошедшего через трубу за время измерения;
- прямое измерение объема, прошедшего через трубу за время измерения;
- калибровка прибора по показаниям стандартного расходомера.

16. СИЛА

Единицей измерения силы является **Ньютон**, который равен силе, приложенной к массе в один килограмм для получения ускорения в 1 м/с^2 . **Вес** тела массой m , покоящегося относительно поверхности земли, — это сила гравитации, действующая на это тело, равная mg , где g — ускорение земного притяжения. Так как вес является силой, единицей его измерения является Ньютон. Однако вес часто указывают в килограммах, соответствующих массе, которая обеспечивает силу веса при фиксированном ускорении земного притяжения. В Табл. 16.1 представлен список систем измерения сил и весов, рассматриваемых в данной главе а также даются основные их характеристики.

Табл. 16.1. Системы измерения сил

Принцип	Система	Характеристики
Рычажный	1. Равноплечные весы	Взвешивание до 1000 кг, очень точный
	2. Неравноплечные весы	Для больших грузов, очень точный
Компенсационный	3. Компенсационные весы	Очень точный метод, высокая стабильность, диапазон измерений 0.1 Н...1 кН, измерение статических и динамических сил
На упругих элементах	4. Пружинные весы	Низкая точность, дешевизна, диапазон измерений 0.1 Н...10 кН, измерение только статических сил
	5. Измерительное кольцо	Точность $\pm 0.2 \dots 0.5\%$, диапазон измерений 2 кН...2 МН, измерение только статических сил
	6. Динамометрические элементы	Точность $\pm 0.01 \dots 1\%$, диапазон измерений 5 Н...40 МН, измерение статических и динамических сил
	7. Пьезоэлектрические датчики	Точность $\pm 0.5 \dots 1.5\%$, диапазон измерений 5 кН...1 МН, измерение только динамических сил
По давлению	8. Гидравлическое давление	Точность $\pm 0.25 \dots 1\%$, диапазон измерений 5 кН...5 МН, измерение статических и динамических сил

Дополнительная литература: Noltingk В.Е. (1985), *Jones Instrument Technology*, vol.1, *Mechanical Measurements*, Butterworth-Heinemann.

Рычажные методы взвешивания

Рычажные методы взвешивания базируются на принципе моментов сил, т.е. при статическом равновесии алгебраическая сумма моментов сил по часовой стрелке вокруг оси должна быть равна сумме моментов сил против часовой стрелки. Момент силы — это произведение силы на расстояние по нормали от оси до линии действия силы.

1. Равноплечные весы

На Рис. 16.1 показан принцип действия равноплечных весов. Они состоят из жесткого коромысла, вращающегося на ножевой опоре. Измеряемая сила F_u приложена на таком же расстоянии от оси вращения, как и известная балансирующая сила F_k . При равновесии, когда коромысло весов находится в горизонтальном положении, справедливо:

$$F_u d = F_k d,$$

где d — расстояние от линии приложения сил до оси вращения. Таким образом, $F_u = F_k$. Силы, сравниваемые этим методом, часто являются весами, так что $m_u g = m_k g$. В связи с тем, что ускорение земного притяжения является одним и тем же на обоих концах коромысла, неизвестная масса m_u равна известной массе m_k . Известная масса подбирается до тех пор, пока не наступит равновесие. Этот тип весов в основном применяется для взвешивания химических веществ, некоторые виды таких весов могут использоваться для взвешивания масс до 1000 кг с очень высокой точностью.

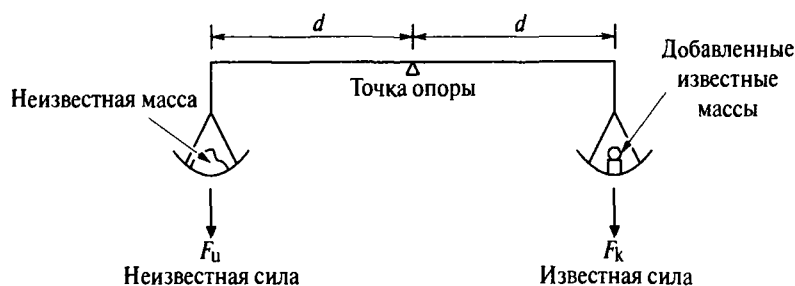


Рис. 16.1. Равноплечные весы

2. Неравноплечные весы

На Рис. 16.2 показан принцип действия неравноплечных весов. Измеряемая сила F_u уравнивается перемещением точки приложения постоянной известной силы F_k на различные расстояния от оси вращения. При равновесии, когда коромысло находится в горизонтальном положении, справедливо выражение:

$$F_u a = F_k b.$$

Так как a — постоянная величина, измеряемая сила F_u пропорциональна расстоянию b . Градуированная шкала вдоль рейки коромысла позволяет непосредственно считывать вес при наступлении баланса. Диапазон балансировки изменяется добавочными массами на конце коромысла, удаленном на расстояние c от оси вращения. Такой вид весов широко применяется в промышленности. Они громоздки, но могут быть очень точными.

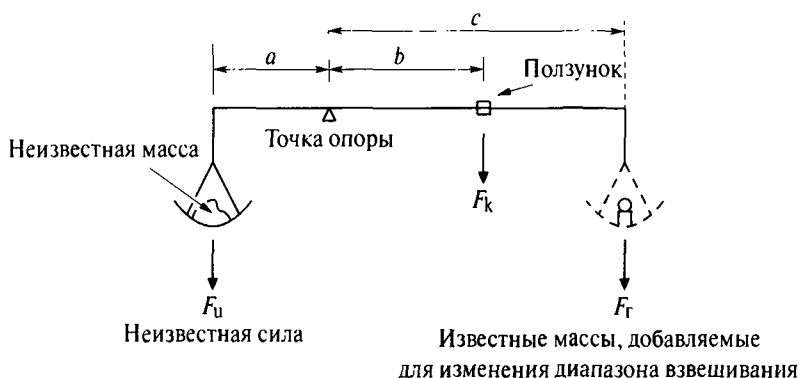


Рис. 16.2. Неравноплечные весы

Компенсационные методы

Компенсационные методы базируются на том, что неизвестная сила вызывает перемещение некоторого объекта, которое фиксируется датчиком перемещения. При этом вырабатывается сигнал, который после усиления используется для активации другого преобразователя, вызывающего силовое воздействие, точно уравновешивающее неизвестную силу и возвращающее перемещенный объект к исходному положению.

3. Компенсационные весы

На Рис. 16.3 показан принцип действия таких весов. Неизвестная сила приводит в движение ферромагнитный якорь линейно перестраиваемого дифференциального трансформатора (см. пункт 12 главы 8). Электрический сигнал с выхода этого трансформатора усиливается и подается на катушку, находящуюся в магнитном поле. В результате магнитная сила будет действовать на катушку, а, следовательно, и на якорь, к которому приложена сила, которую необходимо измерить. Когда магнитная сила уравновесит неизвестную силу, усиленный сигнал линейно регулируемого дифференциального трансформатора становится мерой приложенной силы. Такие методы измерения сил имеют высокую стабильность, очень высокую точность, диапазон измерений 0.1 Н...1 кН и могут применяться как для статических, так и динамических измерений.

Методы измерения сил, использующие элементы упругости

Основной принцип построения систем для измерения силы при помощи элементов упругости состоит в том, что изменение длины такого элемента прямо пропорционально приложенной силе, т.е. для этого элемента выполняется закон Гука. Изменение длины часто преобразуется в какую-либо другую переменную величину при помощи другого преобразователя.

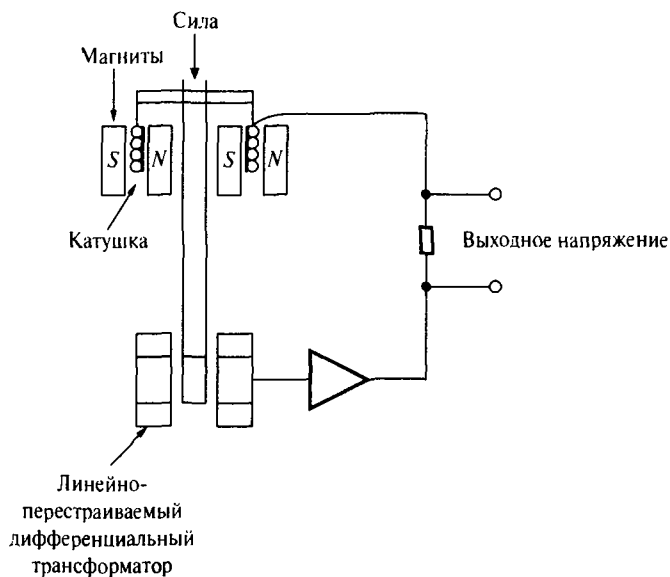


Рис. 16.3. Компенсационные весы

4. Пружинные весы

В пружинных весах (**Рис. 16.4**) для измерения приложенной силы используется растяжение пружины. Пружинные весы имеют низкую точность, так как растяжение пружины, получаемое на них, относительно небольшое. Они пригодны только для измерения статических сил, имеют диапазон измерений 0.1 Н...10 кН, их преимуществом является дешевизна.

5. Измерительное кольцо

При применении измерительного кольца (см. пункт 20 главы 8 и **Рис. 8.22**) сила прилагается по диаметру кольца и вызывает его деформацию, величина которой будет пропорциональна этой

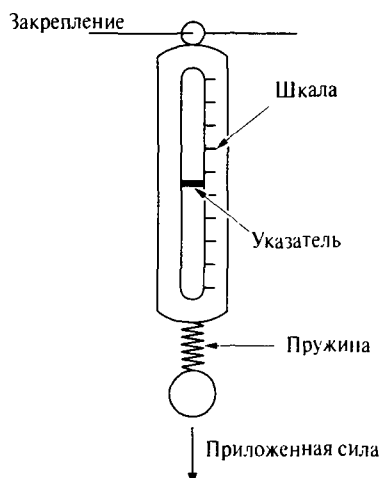


Рис. 16.4. Пружинные весы

силе. Деформация может быть измерена микрометром с круговой шкалой. Для более точных измерений может быть применен винтовой микрометр или электрический преобразователь, например линейно-перестраиваемый дифференциальный трансформатор. Результаты измерений, полученные при помощи измерительного кольца, могут быть непосредственно считаны или переданы на устройство отображения, расположенное на некотором расстоянии. Измерительные кольца могут быть очень точными (0.2...0.5%), имеют диапазон измерений 2...2000 кН, но используются только для измерения статических сил.

6. Динамометрические элементы

Датчики деформации могут использоваться для определения деформации некоторых упругих элементов при воздействии на них некоторой силы. Это дает возможность произвести измерение этой силы. Такие системы называются динамометрическими элементами. Упругие элементы могут быть полыми или целыми цилиндрами (см. пункт 21 главы 8 и **Рис. 8.23**), кольцами, консолями, сдвиговыми элементами или диафрагмами (см. **Рис. 18.7**). Обычно используются четыре тензометрических датчика деформации, и, когда прилагается сила, два тензометра находятся в растяжении, а два других — в сжатом состоянии. Эти тензометры образуют плечи моста Уитстона, в котором в противоположные плечи моста включаются датчики, подвергаемые сжатию. Использование четырех одинаковых тензометров, по одному в каждом плече моста, устраняет влияние температурных изменений на величину их сопротивления, так как температурные эффекты оказывают одинаковое воздействие на каждый из этих датчиков, и поэтому не приводят к появлению разности потенциалов разбалансировки моста. При отсутствии нагрузки все четыре тензометра имеют одинаковое сопротивление, и поэтому выходная разность потенциалов моста равна нулю. При воздействии силы возникает разность потенциалов разбалансировки моста, которая связана с величиной приложенной силы. Такие устройства позволяют передавать информацию на расстояние, имеют быструю реакцию на изменения силы, могут применяться как для статических, так и для динамически меняющихся сил, прочные, имеют точность порядка $\pm 0.01 \dots 1.0\%$ и диапазон измерения 5 Н...40 МН в зависимости от формы деформируемого элемента.

7. Пьезоэлектрические методы

Сжимающие силы, приложенные к противоположным граням некоторых кристаллов, приводят к появлению на этих гранях зарядов, количество которых пропорционально величине приложенной силы (см. пункт 15 главы 8). Этот эффект известен как *пьезоэлектрический эффект*. Он используется для измере-

ния динамических сил и малопригоден для измерения статических нагрузок. Датчики небольшие, прочные, применяются для сжимающих усилий в диапазоне измерения 5 кН...1 МН и имеют точность $\pm 0.5 \dots 1.5\%$.

Методы измерения сил по давлению

8. Метод гидравлического давления

Система измерения сил по измерению давления (Рис. 16.5) состоит из камеры, соединенной с датчиком давления, например манометром Бурдона. Камера имеет диафрагму, к которой и прилагается сила. Это приводит к изменению давления масла, величина которого считывается по показаниям датчика давления. Этот датчик может быть непосредственно отградуирован в единицах приложенной силы. Такие приборы удобны тем, что не требуют электропитания, могут выдавать информацию по месту и дистанционно, имеют относительно быструю реакцию на изменения силы и могут применяться для измерения статических и динамических сил. Их диапазон измерения — 5 кН...5 МН. Точность — $\pm 0.25 \dots 1.0\%$.

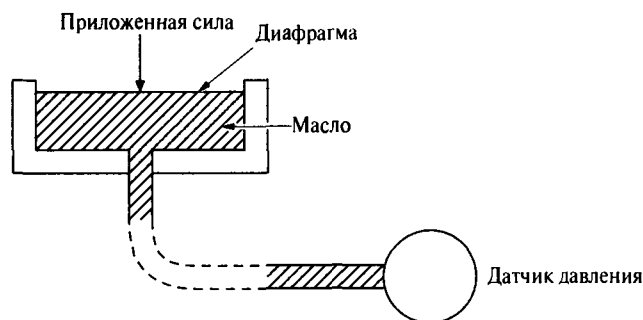


Рис. 16.5. Система для измерения сил по гидравлическому давлению

17. УРОВЕНЬ

В Табл. 17.1 представлены методы определения уровня, обсуждаемые в этой главе, и их общие характеристики. Там, где метод включает использование датчиков, погруженных непосредственно в основную емкость, может потребоваться применение *успокоительной камеры*. Это может быть просто труба, окружающая датчик, например поплавков, погруженная в жидкость и заполненная до того же уровня, что и жидкость в основной емкости, через небольшие отверстия в стенке трубы и, таким образом, предотвращающая прямое воздействие возмущений на датчик. Такие камеры, однако, могут создавать дополнительное запаздывание реакции. Часто датчик устанавливается в боковом от основного сосуда отводе. В таких ситуациях может возникнуть проблема, связанная с различием температур между сосудом и боковым отводом.

Табл. 17.1. Методы измерения уровня

Принцип	Система	Характеристики
Визуальный	1. Указатель уровня	Простой, дешевый, не непрерывный метод фиксации для жидкостей
	2. Крючкообразный индикатор	Простой, дешевый метод для небольших изменений уровня жидкости
	3. Смотровое стекло	Дешевый, может использоваться для открытых сосудов и емкостей под давлением до 70 Мпа и температуре до 300°C
Поплавковый	4. Поплавок на тросике	Дешевый, может применяться с агрессивными жидкостями в широком температурном диапазоне
	5. Потенциометрический поплавок датчик	Выход по напряжению, дешевый, может применяться с агрессивными жидкостями в широком температурном диапазоне
	6. Магнитный поплавок датчик	Может использоваться с агрессивными жидкостями и в более широком диапазоне температур
По перемещению	7. Датчик с пружинными весами	Может применяться для определения границ раздела жидкостей, точный, но имеет ограниченный диапазон измерения
	8. Торсионный трубчатый датчик	Может использоваться для определения границ раздела жидкостей, точный, дает электрический и пневматический выходной сигнал, но имеет ограниченный диапазон измерения
По давлению	9. Датчик давления	Может использоваться для открытых сосудов и емкостей под давлением. Вид выходного сигнала зависит от типа применяемого датчика давления
	10. Пузырьковый метод	Может применяться с агрессивными жидкостями и суспензиями. Вид выходного сигнала зависит от типа используемого датчика давления
Весовой	11. Динамометрические элементы	Может использоваться для жидкостей, суспензий, твердых тел и агрессивных жидкостей. Электрический выходной сигнал от датчиков деформаций

Табл. 17.1 (окончание)

Принцип	Система	Характеристики
Электрический	12. Индикатор уровня по проводимости	Указывает только момент достижения критического уровня. Применим для жидкостей с высокой электрической проводимостью
	13. Датчик сопротивления	Может использоваться для твердых тел и жидкостей
	14. Емкостный датчик	Может использоваться при работе с агрессивными жидкостями, при высоких температурах и давлениях, компактный, точный
Ультразвуковой	15. Эхолокационная	Может использоваться для твердых тел и жидкостей, в частности, для агрессивных жидкостей, для определения границ раздела, относительно дорогой
Радиационный	16. Поглощение излучения	Может использоваться для твердых тел и жидкостей, в частности, для агрессивных, и при высокой температуре
Тепловой	17. Элемент с нагреваемой провололочкой	Определяет достижение критического уровня
	18. Термистор	Определяет достижение критического уровня

Дополнительная литература: Cho С. Н. (1982), *Measurement and Control of Liquid Level*, Instrument Society of America; Noltingk В. Е. (ed.) (1985), *Jones Instrument Technology*, vol.1, *Mechanical Measurements*, Butterworth-Heinemann.

Визуальные методы

Визуальные методы основаны на визуальном наблюдении уровня по определенной шкале. Для таких методов требуется время для считывания показаний, но их точность достижима на уровне $\pm 1\%$.

1. Указатель уровня

Указатель уровня (Рис. 17.1) является простым и дешевым методом определения уровня жидкости в сосуде, например уровня масла в двигателе автомобиля. Он представляет собой про-

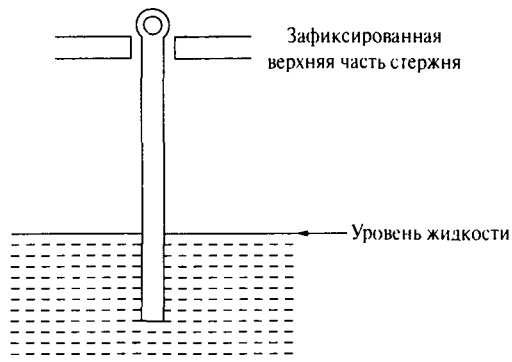


Рис. 17.1. Указатель уровня

стой стержень, который держится вертикально и в определенном положении в жидкости. Стержень затем вынимается и по оставшейся отметке от жидкости на нем определяется положение уровня. Указатель уровня имеет то неудобство, что должен выниматься и проверяться для считывания его показания.

2. Крючкообразный индикатор

Эта разновидность указателя уровня показана на **Рис. 17.2**. Положение вершины крючка подстраивается при помощи винта, пока она не начинает только выступать над поверхностью жидкости. Количество оборотов винта является мерой уровня жидкости.

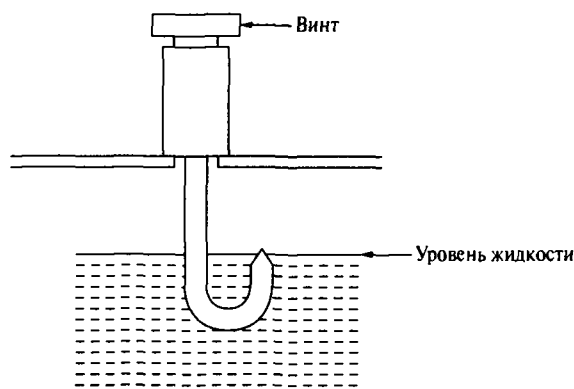


Рис. 17.2. Крючкообразный индикатор

3. Смотровое стекло

При использовании смотрового стекла уровень жидкости наблюдается непосредственно по шкале. На **Рис. 17.3** показаны два варианта трубчатых смотровых стекол. Один применяется для жидкостей в открытых емкостях, а другой — в сосудах под давлением. Датчики представляют собой прозрачные трубки, выполненные из стекла или пластика. Они могут применяться до давления 3 МПа и температуры до 200°C. Плоская форма смотрового стекла (**Рис. 17.4**) может использоваться до давления 70 МПа и температуры 300°C. Основной недостаток смотровых стекол состоит в том, что они дают информацию только по месту расположения емкости. Точность считывания данных зависит от чистоты стекла и жидкости.

Поплавковые методы

Основной элемент таких приборов — поплавков, плавающий на поверхности жидкости и перемещающийся вверх и вниз при изменениях уровня жидкости. Движение поплавка передается указателю, перемещающемуся по шкале при помощи разнообразных механизмов. Ошибки определения уровня жидкости возникают из-за отложения различных осадков на поплавке и его коррозии, так как это приводит к изменению массы поплавка.

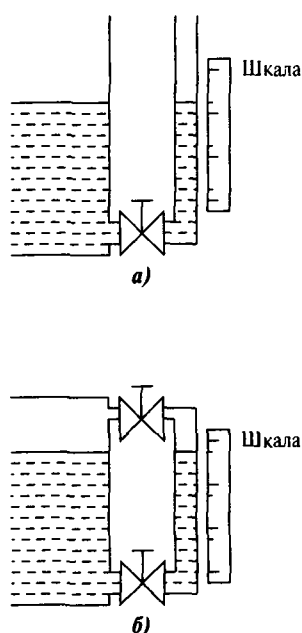


Рис. 17.3. Трубчатые смотровые стекла:
а — для открытых емкостей;
б — для закрытых резервуаров

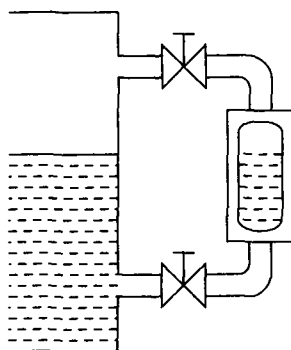


Рис. 17.4. Плоское смотровое стекло

4. Поплавок на тросике

Для поплавкового датчика с тросиком (**Рис. 17.5**) поплавок прикрепляется к одному концу металлического тросика, который проходит через шкив к противовесу. Когда уровень жидкости изменяется, поплавок перемещается, противовес поддерживает тугое натяжение тросика. Это заставляет двигаться тросик, который, в свою очередь, вращает вал шкива, при этом стрелка перемещается по шкале. Выбор материала поплавка зависит от агрессивности жидкости. Наиболее распространенными материалами являются: латунь, медь, никелевые сплавы или нержавеющая сталь. Поплавки обычно имеют форму сферы или цилиндра. Такие датчики могут применяться в широком температурном

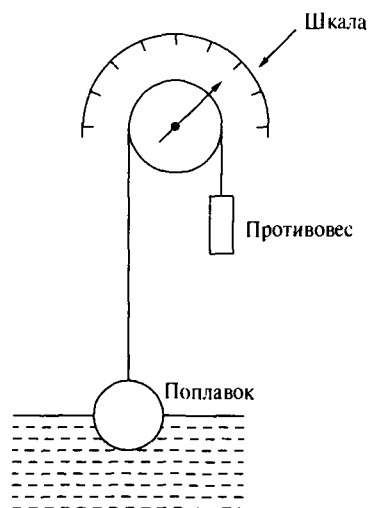


Рис. 17.5. Поплавковый датчик на тросике

диапазоне, с агрессивными жидкостями, но такие устройства могут использоваться только в открытых емкостях.

5. Потенциометрический поплавковый датчик

С потенциометрического поплавкового датчика снимается выходной сигнал в виде напряжения (**Рис. 17.6**). Поплавок размещается на одном конце поворачивающегося на оси стержня, другой конец которого соединен с ползунком потенциометра. Изменение уровня приводит поплавок в движение. Следовательно, перемещается и ползунок потенциометра по треку, и, таким образом, создается разность потенциалов на выходе датчика, связанная с уровнем жидкости. Потенциометрические датчики широко применяются для определения уровня жидкости, например такие устройства часто используются для индикации количества топлива в баках автомобилей.

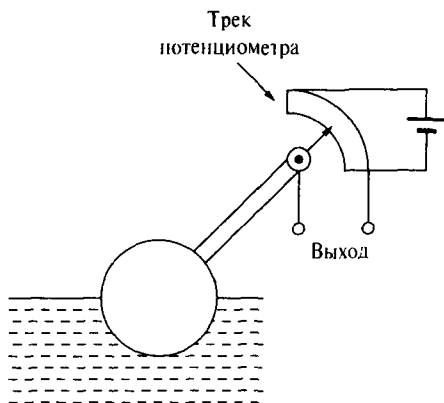


Рис. 17.6. Потенциометрический поплавковый датчик

6. Магнитный поплавковый датчик

Магнитный поплавковый датчик имеет поплавок торообразной формы из магнитного материала, который скользит вверх и вниз вокруг герметизированной от жидкости трубки. В трубке находится постоянный магнит, который может перемещаться вверх и вниз вслед за поплавком (Рис. 17.7). Этот магнит соединен с концом рычага, движение которого вверх и вниз перемещает стрелку по шкале. Преимущество такой конструкции в том, что «поплавковое» устройство внутри трубки не контактирует с жидкостью, и поэтому не требуется герметично заделывать ось поплавка. Следовательно, такие датчики особенно полезно применять для агрессивных жидкостей.

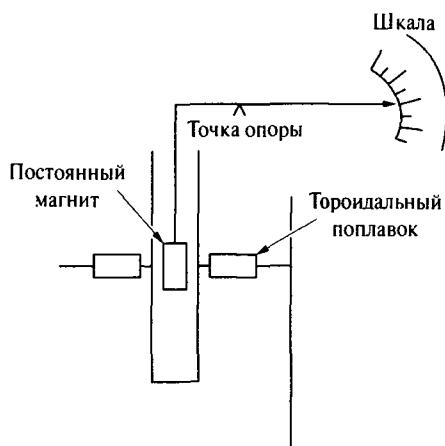


Рис. 17.7. Магнитный поплавковый датчик

Датчики по перемещению

Когда предмет частично или полностью погружен в жидкость, он подвергается действию выталкивающей силы, равной весу вытесненной им жидкости (*Закон Архимеда*). Таким образом, изменение части предмета, погруженной ниже поверхности жидкости, приведет к изменению выталкивающей силы. Результирующая сила, действующая на такой объект, направлена вниз и равна его весу минус выталкивающая сила, и, таким образом, она зависит от глубины, на которую объект погружен в жидкость, и, следовательно, от количества вытесненной им жидкости.

Для вертикального цилиндра с площадью поперечного сечения A погружение на высоту h ниже поверхности жидкости с плотностью ρ создает выталкивающую силу $hA\rho g$. Таким образом, измеренный вес тела равен $(mg - hA\rho g)$, где m — масса цилиндра, g — ускорение земного притяжения. Перемещение такого датчика может быть отградуировано в зависимости от вида жидкости, так как выталкивающая сила зависит от плотности конкретной жидкости. Такие устройства могут применяться для определения границы раздела между двумя жидкостями.

7. Датчик с пружинными весами

Это устройство состоит из погружаемого в жидкость тела цилиндрической формы, удерживаемого пружинными весами (Рис. 17.8). Когда уровень жидкости повышается, доля погруженной части тела увеличивается, и, следовательно, растет выталкивающая сила. В результате фиксируемый вес тела уменьшается при повышении уровня жидкости.

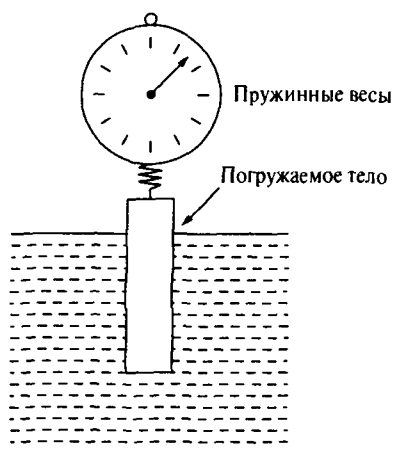


Рис. 17.8. Датчик с пружинными весами

8. Торсионный трубчатый датчик

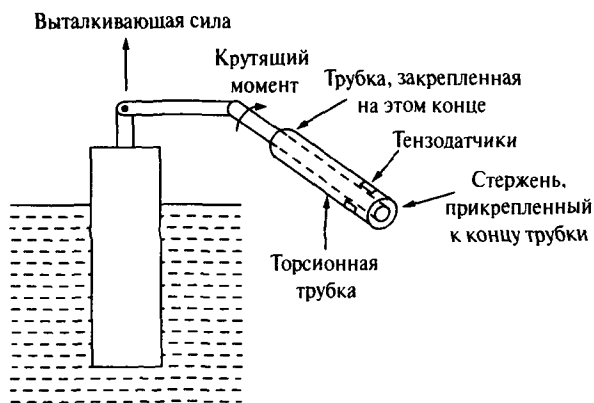
В торсионном трубчатом датчике уровня (Рис. 17.9а) погружаемое тело выталкивается вверх, закручивая трубку. Величина закручивания трубки может определяться при помощи тензометрических датчиков, которые выдают на выходе электрический сигнал, пропорциональный силе выталкивания и, следовательно, измеряемому уровню жидкости. В другой разновидности такого датчика при закручивании трубки передвигается заслонка соплового устройства (см. пункт 25 главы 8), в результате чего на выходе появляется пневматический сигнал (Рис. 17.9б).

Методы по давлению

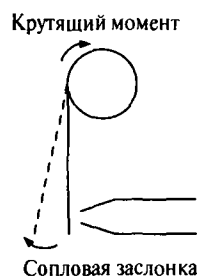
Давление, создаваемое столбом жидкости высотой h над некоторым уровнем, равно $h\rho g$, где ρ — плотность жидкости, g — ускорение земного притяжения.

9. Метод с датчиком давления

Измерение перепада давления между поверхностью жидкости и дном сосуда может служить мерой уровня жидкости. Если емкость сообщается с атмосферой (Рис. 17.10а), то все, что необходимо для таких измерений, — это датчик давления, точнее, перепада давления относительно атмосферного. Для закрытого сосуда должен быть измерен перепад давления между донными слоями

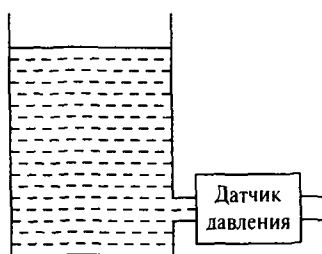


а)

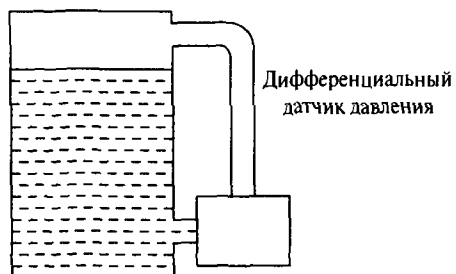


б)

Рис. 17.9. Торсионный трубчатый датчик



а)



б)

Рис. 17.10. Датчики уровня по давлению

а) — открытый резервуар;

б) — закрытый сосуд

жидкости и газом над поверхностью жидкости (Рис. 17.10б). Обычно для этих целей применяются датчики давления диафрагменного типа (см. главу 18). Их располагают на том же уровне, что и минимальный уровень жидкости в сосуде. Если нулевое положение уровня отличается от указанного, то выполняется корректировка. Например, если датчик давления размещается ниже нулевого уровня, то давление от дополнительного перепада высоты должно быть вычтено из значения измеренного давления.

10. Пузырьковый метод

В пузырьковом методе используется трубка, которая погружена по возможности ближе ко дну емкости (Рис. 17.11). Трубка соединена с системой подачи воздуха или другого газа при постоянном давлении. Воздушные пузырьки выходят из нижнего конца трубки. Повышение уровня жидкости над донным концом трубки приводит к росту давления, которое необходимо для появления пузырьков. Вытекание газа, таким образом, определяется давлением в этом устройстве. Это давление будет пропорционально высоте жидкости над донным концом трубки. Его можно измерить диафрагменным датчиком (см. главу 18). Возможной проблемой этого метода является то, что газ, вводимый в жидкость, может взаимодействовать с жидкостью. Целесообразно использовать для изготовления трубки материал, который бы не корродировал в жидкости. Метод может быть использован и с суспензиями.

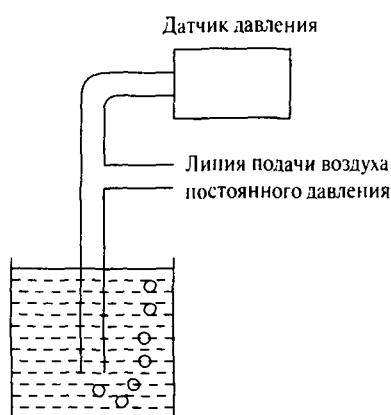


Рис. 17.11. Пузырьковый метод

Весовые методы

Вес жидкости в сосуде определяется произведением ее плотности на объем. Если сосуд имеет постоянную площадь поперечного сечения, то объем пропорционален высоте жидкости, и тогда вес будет непосредственно связан с уровнем жидкости.

11. Динамометрические элементы

Такие элементы (см. пункт 21 главы 8) включаются в опору под сосудом и, следовательно, дают на выходе сигнал, связанный с весом сосуда и его содержимого. Так как вес зависит от уровня жидкости в сосуде, то выходной сигнал, снимаемый с динамометрического элемента, будет пропорционален уровню жидкости. Так как такие элементы полностью изолированы от жидкости, этот метод может быть использован при работе с агрессивными жидкостями. Проблема может возникнуть в тех случаях, когда емкость подвергается воздействию боковых сил, например, таких, как ветер. Метод может применяться для жидкостей, суспензий и твердых тел.

Электрические методы

12. Индикатор уровня по электропроводности

Этот метод может быть применен как индикатор достижения заданного уровня в емкости для жидкостей с высокой электропроводностью. Один из вариантов такого устройства имеет два электрода, один из которых постоянно погружен в жидкость, а другой монтируется либо горизонтально на заданном уровне, либо вертикально, но с расположением нижнего конца на требуемом критическом уровне. Когда жидкость находится ниже заданного уровня, сопротивление между двумя электродами высокое, так как часть электрического пути между ними проходит по воздуху. Однако, когда уровень жидкости достигает уровня верхнего электрода, сопротивление между электродами падает. Это падение сопротивления вызывает существенное увеличение тока в электрической цепи и, таким образом, сигнализирует о достижении критического уровня жидкости в емкости. Набор вертикальных электродов можно расположить таким образом, чтобы нижний конец каждого находился на различных уровнях. Такое устройство можно использовать для контроля различных уровней в емкости. На величину показаний могут влиять такие процессы, как вспенивание, разбрызгивание и турбулентность. Один из вариантов датчиков электропроводности использует этот факт, чтобы определить количество пены на поверхности жидкости. Он имеет набор вертикальных электродов. Изменения сопротивления в тех случаях, когда электроды проходят пену или достигают поверхности жидкости, будут различными. Следовательно, появляется возможность различения уровня жидкости и пены.

13. Датчик уровня по величине сопротивления¹

Один из вариантов такого датчика имеет в своем составе элемент сопротивления, выполненный в виде полоски (**Рис. 17.12**).

¹ Такой тип датчика в отечественной технической литературе называют резистивным датчиком уровня (*прим. ред.*).

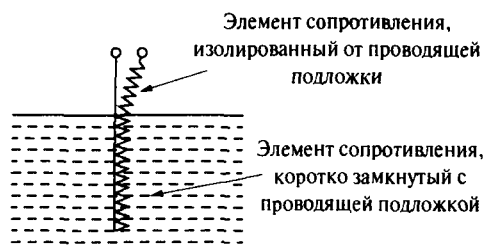


Рис. 17.12. Резистивный датчик уровня

Рядом с этим элементом сопротивления располагается базовая электропроводная полоска. Весь датчик помещается в электрически изолированную оболочку. Когда датчик расположен в жидкости вертикально, на часть его, находящуюся ниже поверхности, действует давление. Это приводит к контакту полосок с сопротивлением и без сопротивления, т.е. появлению короткого замыкания на участке, погруженном в жидкость. Полное сопротивление датчика, таким образом, зависит от степени погружения его ниже уровня жидкости. Метод может применяться как для измерения уровня жидкостей, так и твердых тел.

14. Емкостный датчик уровня

В общем виде емкостный датчик уровня состоит из двух концентрических цилиндров или круглого стержня внутри цилиндра и жидкостью между ними (**Рис. 17.13**). Если сама емкость с жидкостью металлическая, она также может служить в качестве одной из пластин конденсатора с металлическим стержнем в жидкости, действующим как другая пластина. Если жидкость является электрическим изолятором, то пластины конденсатора выполняются из металла. Если жидкость электропроводная, то они покрываются изолятором, например фторопластом. Принципиально такой датчик состоит из двух параллельно соединенных конденсаторов, Один образуется между пластинами внутри жидкости, другой — из части пластин в воздухе над жидкостью. Изменение уровня жидкости меняет общую емкость системы (см. пункт 8 главы 8). Ошибки измерения могут увеличиться из-

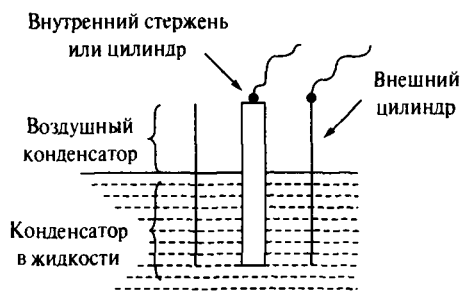


Рис. 17.13. Емкостный датчик уровня

за нестабильности температуры. Кроме того, электроды могут покрываться налетом из осаждаемых из жидкости веществ. Метод может применяться при давлении, не превышающем 14 МПа, и при температуре — до 350°C. При работе в агрессивных жидкостях необходим правильный подбор материалов для изготовления цилиндров. Датчик достаточно прочен. Метод может давать удовлетворительную точность.

Ультразвуковые методы

Ультразвуковые волны — это волны давления с частотой, большей чем 20 кГц. Скорость таких волн зависит от упругости и плотности среды, через которую они проходят, и подвержена влиянию температуры. Когда ультразвуковые волны падают на границу раздела, часть колебательной энергии проходит через эту границу, а часть — отражается. Для отражаемой волны угол падения равен углу отражения.

15. Эхолокация

В одном из вариантов устройства ультразвуковой приемопередатчик размещается над поверхностью жидкости (**Рис. 17.14**). Ультразвуковой импульс падает на поверхность жидкости и отражается от нее к приемнику. Может быть измерено время от момента излучения до приема отраженного импульса. Это время зависит от расстояния поверхности жидкости до приемопередатчика. Таким образом, может быть определено положение уровня этой поверхности.

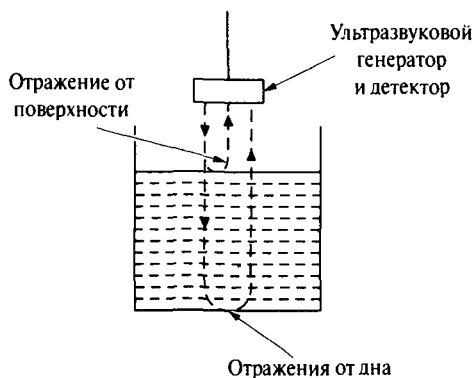


Рис. 17.14. Ультразвуковой датчик уровня

Другая разновидность датчика имеет приемопередатчик, размещенный в жидкости у дна сосуда. Ультразвуковые импульсы направляются вертикально вверх и отражаются от поверхности назад к приемнику. Здесь измеряется время от начала излучения импульса до его приема.

Ультразвуковые методы могут применяться для твердых тел, жидкостей и для границ раздела: жидкость—жидкость и жидкость—твердое тело. Так как приемопередатчик может монтироваться вне жидкости, этот метод особенно полезен для применения с агрессивными жидкостями. Ошибки измерения могут возникнуть из-за изменений температуры, так как последние приводят к изменению скорости распространения звуковой волны. Типичным значением таких ошибок является примерно 0.18% на градус Цельсия.

Радиационные методы

Гамма-лучи являются коротковолновыми электромагнитными волнами, излучаемыми радиоактивными источниками. Они используются для измерения уровня чаще, чем другие виды ядерных излучений из-за их высокой проникающей способности. Эти лучи поглощаются, проходя через среду. Количество поглощенного излучения зависит от длины пути этих лучей в среде и ее плотности.

$$I = I_0 e^{-\mu x},$$

где I_0 — уровень падающего излучения, I — его уровень после прохождения толщины x в среде с коэффициентом поглощения μ . Этот коэффициент зависит от плотности материала.

Дополнительная литература: Loxton R. and Pope P. (ed.) (1986), *Instrumentation: A Reader*, Open University.

16. Методы поглощения

Гамма-излучение испускается радиоактивными источниками, например такими веществами, как кобальт-60, цезий-137 или радий-226, и проходит через стенки контейнера и любую находящуюся в нем жидкость, прежде чем достигнет ядерно-радиационного детектора (см. главу 19). Интенсивность измеренного излучения зависит от количества жидкости между источником и детектором излучения. На Рис. 17.15 показаны два варианта такого устройства. Для устройства с компактным источником и протяженным детектором можно определять изменение уровня излучения вдоль всей длины детектора. Для компактного источника и компактного детектора выходной сигнал будет показывать изменение уровня жидкости только в узком диапазоне. Такие методы могут применяться для жидкостей, суспензий и твердых тел. Так как никакие элементы измерительной системы не соприкасаются с жидкостью, то допустимо использование таких устройств с агрессивными и высокотемпературными жидкостями. Оборудование это достаточно дорогое. Здесь существуют также некоторые проблемы с обеспечением безопасности, связанные с применением радиоактивных источников.

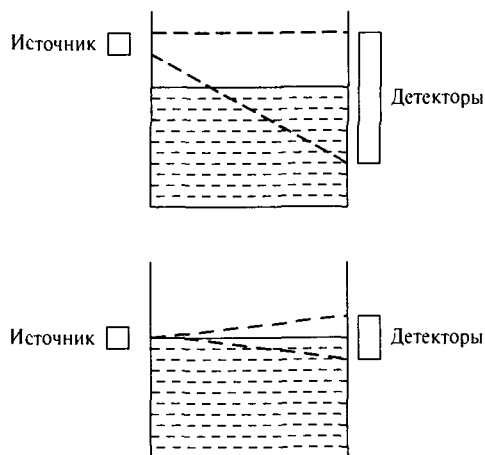


Рис. 17.15. Радиационные системы измерения уровня

Термические методы

17. Элемент с нагретой проволочкой

Нагретая проволочка может быть использована для определения уровня поверхности жидкости (**Рис. 17.16**). Скорость теплоотвода от проволочки, по которой течет ток, зависит от среды, в которую помещена эта проволочка (см. пункт 2 главы 8). Таким образом, температура такой проволочки зависит также от типа среды. Так как электрическое сопротивление проволочки зависит от ее температуры, то, следовательно, величина этого сопротивления будет изменяться при прохождении проволочки через границу раздела жидкости с газом. Если проволочка является одним из плеч моста Уитстона, то мост при этом перейдет из состояния баланса с нулевой разностью потенциалов на выходе в состояние разбаланса, следовательно, на его выходе появится сигнал, который и будет использоваться для определения уровня поверхности.

18. Термистор

Работа такого устройства подобна описанной выше для элемента с нагретой проволочкой, но вместо проволочки используется термистор (см. пункты 1 и 2 главы 8). Изменения сопротивления термистора при его перемещении из зоны над поверхностью жидкости под ее поверхность могут быть существенно большими, чем аналогичные изменения для металлической проволочки.

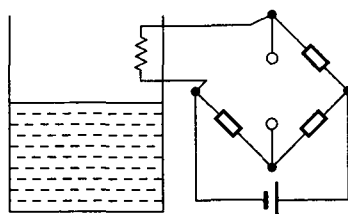


Рис. 17.16. Элемент с нагретой проволочкой

18. ДАВЛЕНИЕ

Давление определяется как нормальная сила, действующая на единицу поверхности. Нормальная сила направлена под прямым углом к плоскости поверхности. Единицей измерения давления является **Паскаль (Па)**. Один Паскаль равен 1 Н/м^2 . Термин **абсолютное давление** применяется для давления, измеренного относительно нулевого давления. Термин **давление датчика (относительное давление)** используется для давления, измеренного относительно атмосферного давления. На поверхности Земли абсолютное давление считается равным 100 кПа. Иногда его называют как давление, равное 1 бар. Большинство систем измерения давления дают значение относительного давления. Поэтому на поверхности Земли справедливо:

$$\text{Абсолютное давление} = \text{относительное давление} + \text{атмосферное давление.}$$

В Табл. 18.1 приведен список систем измерения давления, рассматриваемых в этой главе, и их основные характеристики.

Табл. 18.1. Системы измерения давления

Принцип	Система	Характеристики
По высоте столба жидкости	1. U-образный трубчатый манометр	Простой, дешевый, давление 20 Па...140 кПа
	2. Технический манометр	Позволяет непосредственно измерять давление в диапазоне 20 Па...140 кПа
	3. Манометр с наклонной трубкой	Большая точность по сравнению с обычной U-образной трубкой
	4. Барометр Фортина	Измеряет атмосферное давление
Диафрагменный	5. Магнитное сопротивление	Диапазон измерений 1 Па...100 МПа, частотная полоса до 1 кГц, точность $\pm 0.1\%$
	6. Емкость	Диапазон давлений 1...200 кПа. Полоса частот до 1 кГц, точность $\pm 0.1\%$
	7. Тензометр	Диапазон давлений 0...100 МПа, полоса частот до 1 кГц, точность $\pm 0.1\%$
	8. Баланс сил	Диапазон давлений 0...100 кПа, точность $\pm 0.2\%$
Капсульный и сильфонный	9. Анероидный барометр	Измеряет атмосферное давление
	10. Сильфон	Диапазон давлений 200 Па...1 МПа, точность $\pm 0.1\%$, плохая стабильность нуля
Трубки Бурдона	11. Приборы на трубках Бурдона	Диапазон давлений 10 кПа...100 МПа, прочные, точность $\pm 1\%$
Вибрирующая струна	12. Диафрагменная	Диапазон давлений до 180 кПа, точность $\pm 0.2\%$
	13. Трубка Бурдона	Диапазон давлений 10 кПа...100 МПа, прочные, точность $\pm 1\%$
Пьезо-электрический	14. Пьезо-электрическая	Диапазон давлений до 500 кПа. Полоса частот 5 Гц...500 кГц

Дополнительная литература: Noltingk В. Е. (ed.) (1985), *Jones Instrument Technology*, vol. 1, *Mechanical Measurements*, Butterworth-Heinemann.

Измерители давления по высоте столба жидкости (манометры и барометры)

Рассматривается относительное давление на некоторой глубине h покоящейся жидкости, возникающее из-за действия веса столба жидкости над ней. Сила, действующая на поверхность площадью A на этой глубине, равна весу жидкости, находящейся непосредственно над этой площадкой, т.е. $hA\rho g$. Здесь g — ускорение земного притяжения, ρ — плотность жидкости. Таким образом, давление равно:

$$\text{Давление } P = \frac{hA\rho g}{A} = h\rho g.$$

1. U-образный манометр

Базовый вид U-образного трубчатого манометра состоит из U-образной трубки, содержащей жидкость. Перепад давления газов над жидкостью в двух ветвях создает разность h в вертикальных высотах жидкости. Для манометра, показанного на Рис. 18.1, давления у оснований двух столбиков равны $(P_1 + h_1\rho g)$ и $(P_2 + h_2\rho g)$. Так как они одинаковы, то:

$$P_1 + h_1\rho g = P_2 + h_2\rho g,$$

где ρ — плотность жидкости в манометре, g — ускорение земного притяжения. Следовательно:

$$\text{Перепад давления} = P_1 - P_2 = h\rho g.$$

Если одна из ветвей такого манометра сообщается с атмосферой, то перепад давления равен относительному давлению.

В качестве манометрических жидкостей обычно используются вода, спирт или ртуть. При этом может быть измерен перепад давления в диапазоне 20 Па... 140 кПа. Ошибки могут возрастать, если высоты измерены не в строго вертикальном направлении, а

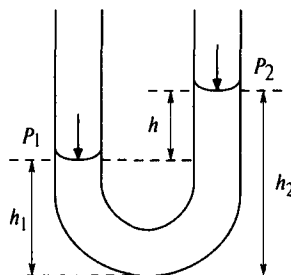


Рис. 18.1. U-образный трубчатый манометр

также за счет действия температуры на плотность жидкости и использования неточных величин ускорения земного притяжения. На точность также влияет трудность получения правильного значения уровня манометрической жидкости в трубке из-за наличия ее менисков. Типичное значение погрешности измерения перепада давления при помощи U-образной трубки составляет $\pm 1\%$.

Поправки, которые необходимо делать на температурную зависимость плотности манометрической жидкости, вытекают из следующего: масса m жидкости при 0°C в объеме V_0 и плотности ρ_0 связаны соотношением:

$$m = \rho_0 V_0.$$

При температуре θ та же масса жидкости будет иметь объем V_θ и плотность ρ_θ , т.е.

$$m = \rho_\theta V_\theta.$$

Следовательно:

$$\rho_\theta V_\theta = \rho_0 V_0.$$

Объем при температуре θ связан с объемом при температуре 0°C как:

$$V_\theta = V_0(1 + \gamma\theta),$$

где γ — коэффициент объемного расширения жидкости. Следовательно:

$$\rho_\theta = \frac{\rho_0 V_0}{V_\theta} = \frac{\rho_0}{1 + \gamma\theta}.$$

Таким образом, пренебрегая любыми другими поправками, давление, измеренное таким манометром при температуре θ , приводится к давлению при 0°C по формуле:

$$P = H \rho_\theta g = \frac{H \rho_0 g}{1 + \gamma\theta}.$$

Ускорение земного притяжения зависит от географической широты и высоты над поверхностью земли, уменьшаясь на $3.086 \times 10^{-6} \text{ м/с}^2$ на каждый метр выше уровня моря. Таким образом, в $[\text{м/с}^2]$

$$g = 9.78049 (1 + 0.005288 \sin^2 \varphi - 0.0000059 \sin^2 2\varphi) - 0.000003086 H,$$

где φ — географическая широта, а H — высота над уровнем моря в метрах. В **Табл. 18.2** приведены некоторые типичные значения g для нулевых высот над уровнем моря.

Табл. 18.2. Ускорение земного притяжения

Широта	$g, [м/с^2]$	Широта	$g, [м/с^2]$
0°	9.78049	50°	9.81079
10°	9.78204	60°	9.81924
20°	9.78652	70°	9.82614
30°	9.79338	80°	9.83065
40°	9.80181	90°	9.83221

2. Технический манометр

Технический вариант U-образного манометра (**Рис. 18.2**) имеет одну из ветвей с на много большей площадью поперечного сечения по сравнению с другой. Перепад давления между двумя ветвями создает разницу уровней жидкости, перетекающей из одной ветви в другую. Для такого устройства справедливо соотношение:

$$\text{Перепад давления} = P_1 - P_2 = H\rho g.$$

Но здесь $H = h + d$, где h и d — изменения уровней в каждой ветви от уровня, существовавшего до возникновения перепада давления. Таким образом,

$$\text{Перепад давления} = (h + d)\rho g.$$

При различных высотах столбов объем жидкости, вытекающей из одной ветви, должен равняться объему жидкости, входящей в другую ветвь. Следовательно:

$$A_1 h = A_2 d,$$

где A_1 и A_2 — площади поперечных сечений в двух ветвях манометра. Отсюда вытекает, что

$$\begin{aligned} \text{Перепад давления} &= [(A_2 d / A_1) + d] \rho g = [(A_2 / A_1) + 1] d \rho g = \\ &= [a_{\text{const}}] d \rho g. \end{aligned}$$

Таким образом, перемещение уровня жидкости d в широкой трубе от его начального нулевого уровня пропорционально пе-

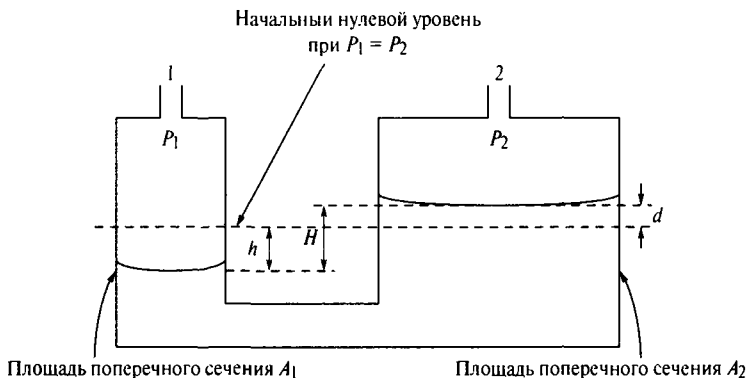


Рис. 18.2. Технический манометр

репаду давления. Этот вид манометра требует измерения уровня жидкости только в одной ветви, и это измерение обычно выполняется от некоторой фиксированной точки. Обычно такое измерение уровня производится при помощи поплавка и рычажной системы, которые перемещают стрелку указателя прибора по шкале (см. главу 17 для ознакомления с измерениями уровня).

3. Манометр с наклонной трубкой

Манометр с наклонной трубкой (**Рис. 18.3**) — это U-образная трубка, одна ветвь которой имеет большую площадь поперечного сечения, чем другая. Узкая ветвь наклонена под некоторым углом θ к горизонтали.

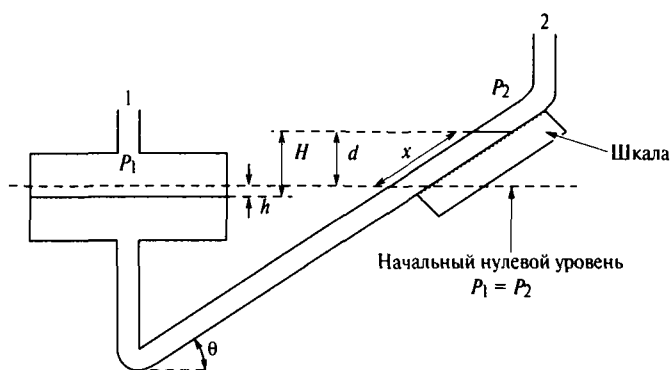


Рис. 18.3. Манометр с наклонной трубкой

Вертикальное смещение уровня жидкости в наклонной ветви связано с перемещением x жидкости вдоль трубки соотношением:

$$d = x \sin \theta.$$

Так как перемещение x измеряется, то справедливо следующее:

$$\text{Перепад давления} = P_1 - P_2 = [(A_2 / A_1) + 1] \rho g x \sin \theta.$$

Так как $A_2 \ll A_1$, уравнение упрощается до:

$$\text{Перепад давления} = \rho g x \sin \theta$$

Так как перемещение x больше, чем вертикальное смещение, это дает более высокую точность по сравнению с обычным U-образным манометром.

4. Барометр Фортина

Барометр Фортина (**Рис. 18.4**) состоит из вертикальной стеклянной трубки в защитном корпусе со шкалами, позволяющими непосредственно считывать высоту поверхности ртути в трубке. Вначале необходимо убедиться, что нуль шкалы совпадает с уровнем ртути в нижнем резервуаре. Эта ртуть находится в контейнере, в который помещен кожаный футляр, способный де-

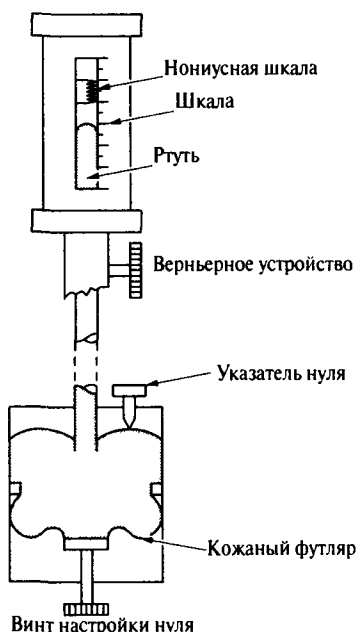


Рис. 18.4. Барометр Фортина

формироваться в своей нижней части при вращении винта настройки нуля так, что уровень ртути в резервуаре совпадает с кончиком указателя нуля. Когда это происходит, считается, что нуль шкалы выставлен корректно и совпадает с уровнем поверхности ртути нижнего резервуара. Нониусная шкала затем устанавливается в такое положение, чтобы она совпадала с поверхностью ртути, и это дает высоту столба ртути.

Ряд поправок должен быть внесен в эти измерения для получения точной величины атмосферного давления. Они должны учитывать влияние температуры на латунную шкалу и плотность ртути, ускорение земного притяжения и эффект поверхностного натяжения. Латунная шкала, используемая для измерения высоты столба, является правильной только при температуре, для которой она градуировалась. При любой другой температуре она будет давать погрешность измерения. Если шкала была отградуирована при 0°C , а температура при измерении равна θ , то:

$$h_{TR} = h(1 + \alpha\theta),$$

где h_{TR} — истинное значение, h — значение высоты, считанное при температуре θ , α — линейный коэффициент термического расширения металлической шкалы. Плотность ртути зависит также от температуры. Если γ — коэффициент термического объемного расширения ртути, то (см. пункт 1)

$$\rho_{\theta} = \frac{\rho_0}{1 + \gamma\theta},$$

где ρ_θ — плотность ртути при температуре θ , ρ_0 — ее плотность при температуре 0°C . Ускорение земного притяжения зависит от географической широты и высоты над уровнем моря (см. пункт 1). Эффект поверхностного натяжения ртути в трубке занижает уровень при его считывании. Величина этого занижения зависит от диаметра трубки и формы мениска. В Табл. 18.3 представлены соответствующие поправки для различных диаметров трубок и различных высот менисков, т.е. высоты ртути в центре трубки над высотой в месте, где ртуть контактирует со стеклом.

Табл. 18.3. Поправки на поверхностное натяжение

Диаметр трубки [мм]	Поправка, добавляемая к высоте [мм], для менисков высотой [мм]			
	0.2	0.5	1.0	1.5
5	0.38	0.92	1.62	—
10	0.07	0.17	0.32	0.42
15	0.02	0.05	0.09	0.12
20	0.005	0.010	0.024	0.034

Для возможности сравнения результатов обычно приводят высоту барометрического уровня ртути в значениях, приведенных к 0°C и ускорению земного притяжения, равному 9.80665 м/с^2 . Если высота h_{TR} получена при температуре θ , т.е. эта высота приведена к температуре 0°C , плотность ртути равна ρ_θ , а ускорение земного притяжения — g , то атмосферное давление при этой температуре можно определить по формуле:

$$\text{Давление} = h_{\text{TR}} \rho_\theta g = h(1 + \alpha\theta) \rho_\theta g,$$

где h — измеренная высота по шкале. Эквивалентное давление при 0°C равно:

$$\text{Эквивалентное давление} = h_0 \rho_0 g = h(1 + \alpha\theta) \rho_\theta g,$$

где h_0 — эквивалентная высота при 0°C , ρ_0 — плотность ртути при 0°C .

$$\text{Эквивалентное давление} = \frac{h(1 + \alpha\theta) \rho_\theta g}{1 + \gamma\theta} = h \rho_0 g \left(1 - \frac{\{\gamma - \alpha\}\theta}{1 + \gamma\theta} \right).$$

Эквивалентное значение высоты ртути h_0 определяется выражением:

$$h_0 = h \left(1 - \frac{\{\gamma - \alpha\}\theta}{1 + \gamma\theta} \right).$$

Все выражения, которые приведены выше, соответствуют ускорению земного притяжения, равному g . Формула приведения к эквивалентному значению при стандартной величине ускорения земного притяжения, равной 9.80665 м/с^2 , задается в виде:

$$\text{Эквивалентное значение} = \frac{h_0 g}{9.80665}.$$

Диафрагмы

Для диафрагменных датчиков давления перепад давления между двумя сторонами диафрагмы приводит к ее прогибу в одну или другую сторону. Диафрагмы могут быть плоскими, гофрированными или выпуклыми. Форма определяется величиной требуемого перемещения и, следовательно, диапазоном измерения давления. Если жидкость, давление которой требуется измерить, давит на одну сторону диафрагмы, а другая сторона открыто сообщается с атмосферой, то диафрагменный датчик будет выдавать избыточное давление. Если другая сторона диафрагмы отвакуумирована и запаена, то датчик будет показывать абсолютное давление. Если на жидкости с двух сторон диафрагмы действуют различные давления, то показания датчика будут соответствовать разности этих давлений. Существует большое количество методов для определения и измерения величины деформации диафрагмы.

5. Электромагнитный диафрагменный датчик с переменным магнитным сопротивлением

На Рис. 18.5 показана принципиальная схема электромагнитного диафрагменного датчика с переменным магнитным сопротивлением. Перемещение центральной части диафрагмы увеличивает магнитное сопротивление на одной стороне диафрагмы и уменьшает его на другой. Устройство по принципу является дифференциальным датчиком перемещения со средней точкой, описанным в разделе 6 главы 9 с мостом переменного тока, выходной разбаланс которого связан с перепадом давления, приводящим к деформации диафрагмы. Диапазон измерений обычно 1 Па...100 МПа с точностью около $\pm 0.1\%$ и полосой частот до 1 кГц.

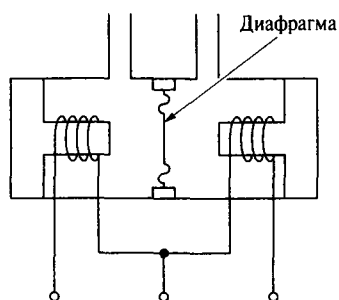


Рис. 18.5. Электромагнитный диафрагменный датчик давления с переменным магнитным сопротивлением

6. Емкостный диафрагменный датчик

Существуют две базовые разновидности таких диафрагменных датчиков (Рис. 18.6). Для одной (Рис. 18.6а) — перемещение диафрагмы относительно фиксированной пластины приводит к изменению емкости между диафрагмой и фиксированной пластиной. Конденсатор может быть составной частью настроечной це-

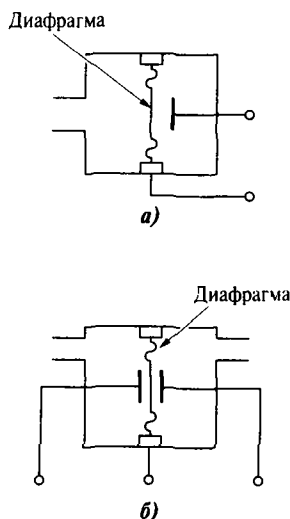


Рис. 18.6. Емкостный датчик давления

пи частотно-модулированного генератора колебаний и, таким образом, выдавать частотный выходной сигнал, связанный с перепадом давления на диафрагме. Для другой разновидности (**Рис. 18.6б**) — диафрагма расположена между двумя фиксированными пластинами, и ее перемещение увеличивает емкость относительно одной пластины и уменьшает ее с другой, т.е. это вид дифференциального датчика перемещений со средней точкой, описанного в разделе 6 главы 9. Такой датчик обычно используется с мостом переменного тока, выходной разбаланс которого связан с перепадом давления на диафрагме. Диапазон измерений обычно равен 1...200 кПа, с точностью около $\pm 0.1\%$ и полосой частот до 1 кГц.

7. Тензометрический датчик давления

Существует много способов (**Рис. 18.7**), при помощи которых тензометрические датчики деформации могут использоваться для измерения перемещения диафрагмы. В одном способе (**Рис. 18.7а**) они приклеены к консоли, прогибающейся при перемещении центральной части диафрагмы. В другом — они непосредственно наклеены на диафрагму. Еще один способ (**Рис. 18.7б**) состоит в использовании полупроводниковых тензодатчиков. Такие датчики могут быть скреплены с поверхностью диафрагмы. Они более удобны при использовании кремниевой подложки как диафрагмы при введении соответствующих легирующих веществ в кремний. При любой форме тензодатчиков они включаются в мост Уитстона, где напряжение разбаланса является мерой перепада давления на диафрагме. Типичные приборы с металлическими проволоочными тензодатчиками применяются в диапазоне давлений 100 кПа...100 МПа. С интегрированными полупроводниковыми датчиками диапазон измерения давления составляет 0...100 кПа. Точность измерения — до $\pm 0.1\%$. Полоса частот — до 1 кГц.

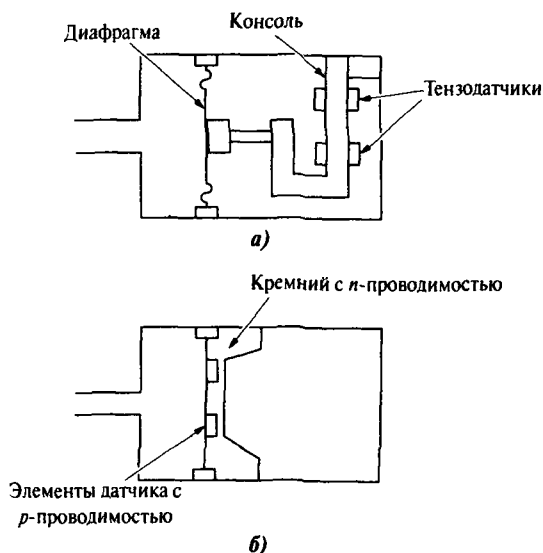


Рис. 18.7. Тензометрические диафрагменные датчики

8. Система на принципе баланса сил

Существует ряд разновидностей таких приборов. Все они, однако, основаны на использовании регулятора давления, управляемого перемещением диафрагмы. Перемещение диафрагмы, будучи измеренным некоторым датчиком, затем создает сигнал, который через цепь обратной связи стремится компенсировать это перемещение. Типичным вариантом такого прибора является **пневматическая система измерения перепада давления** (Рис. 18.8).

Перепад давления на диафрагме приводит к ее перемещению и вследствие этого к воздействию силы на плечо рычага. Рычаг при этом может поворачиваться вокруг оси, и его движение со-

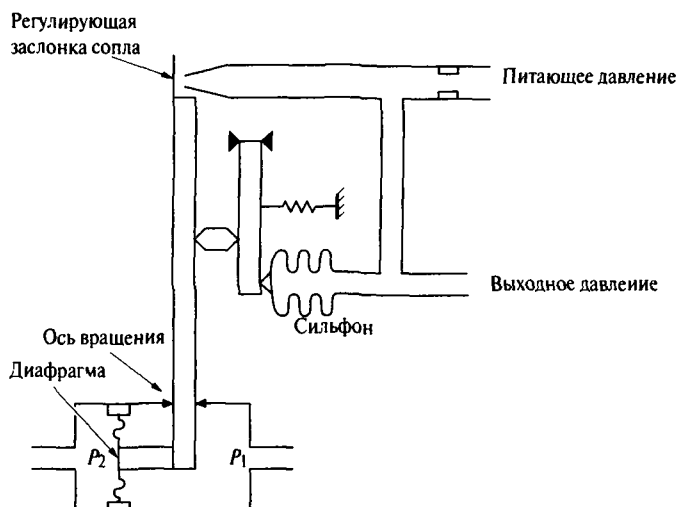


Рис. 18.8. Пневматическая система измерения перепада давления

здает изменение давления в пневматической системе через смещение сопловой заслонки. Это изменение давления воспринимается сильфоном, расширяя или сжимая его в зависимости от результирующих сил на рычаг, чтобы компенсировать перемещение диафрагмы. Пневматическое давление p в системе с сопловой заслонкой измеряет перепад давления на диафрагме. Тогда:

$$p = K(P_1 - P_2) + C,$$

где K и C — постоянные величины. Другие варианты таких датчиков для определения перемещения диафрагмы используют методы измерения магнитного сопротивления или емкости, а также линейно-перестраиваемый дифференциальный трансформатор. Обычно такие датчики имеют диапазон измерения $0 \dots 100$ кПа при точности $\pm 0.2\%$ с характеристическим временем около 1 с.

Капсулы и сильфоны

9. Анероидный барометр

Капсула может рассматриваться как конструкция, состоящая из двух соединенных диафрагм. Примером прибора, использующего капсулы, является анероидный барометр (Рис. 18.9). Он состоит из запаянной капсулы, из которой воздух был частично удален. Изменение атмосферного давления заставляет капсулу расширяться или сжиматься. Перемещение поверхности капсулы, будучи усиленное системой рычагов, приводит в движение стрелку прибора. Если капсула полностью отвакуумирована, то должны быть сделаны поправки на влияние температуры, при которой производилось измерение. Это связано с тем, что величина деформации капсулы зависит от влияния температуры на упругость металла, из которого изготовлены капсула и пружина. Однако небольшое количество воздуха, оставшееся в капсуле, приводит к ее расширению при увеличении температуры и в некоторой степени компенсирует изменения от расширения металла.

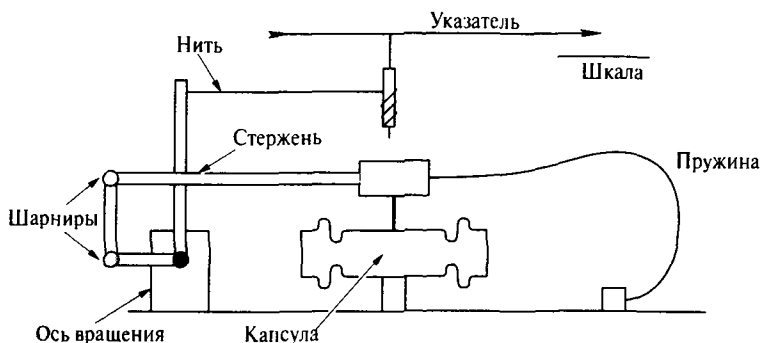


Рис. 18.9. Анероидный барометр

10. Сильфонный датчик давления

Длина сильфонов, а следовательно, перемещение их свободных концов при закреплении других зависит от перепада давления внутри и снаружи. Большое количество методов применяется для измерения этого перемещения. Некоторые из сильфонных датчиков давления показаны на **Рис. 18.10**. Один из них использует перемещение сильфона, чтобы передвигать плечо рычага (**Рис. 18.10а**), другой передвигает сердечник линейно-регулируемого дифференциального трансформатора (**Рис. 18.10б**). Еще один использует движение конца сильфона, чтобы перемещать ползунок потенциометра. Сильфонные датчики применяются для измерения перепадов давления в диапазоне 200 Па...1 МПа с точностью около $\pm 0.1\%$. Они имеют плохую стабильность нуля.

Трубки Бурдона

Трубки Бурдона (см. пункт 24 главы 8) могут быть С-образной или спиральной формы. Увеличение давления в трубке заставляет ее распрямляться, величина этого перемещения зависит от изменения давления.

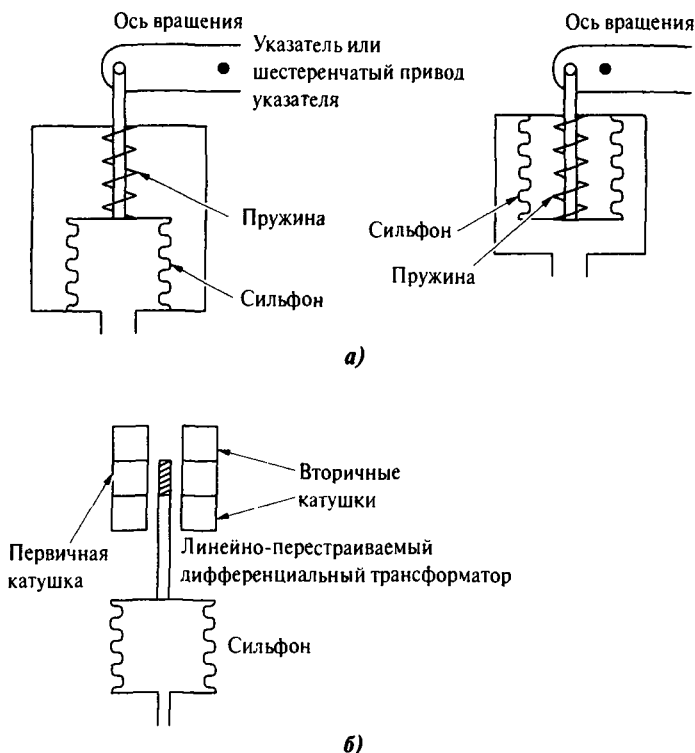


Рис. 18.10. Сильфонные датчики давления

11. Измерители давления на трубках Бурдона

Перемещение конца трубки можно измерять различными способами. Например, непосредственно по перемещению стрелки, приводимой в движение системой шестеренок и рычагов (Рис. 18.11а). Можно перемещать движок потенциометра (Рис. 18.11в) или сердечник линейно-перестраиваемого дифференциального трансформатора (Рис. 18.11б). Приборы на основе трубок Бурдона обычно работают в диапазоне давлений 10 кПа...100 МПа. Этот диапазон зависит от того, какая форма и материал используются для изготовления трубки. С-образные трубки, изготовленные из латуни или фосфористой бронзы, имеют диапазон измеряемых давлений 35 кПа...100 МПа. Спиральные и винтообразные трубки имеют большее расширение и большую чувствительность, но, как следствие этого, меньшее максимальное давление, которое может быть измерено, обычно до 50 МПа. Бурдоновские трубки прочные, имеют точность $\pm 1\%$ к полной шкале измерения. Основные источники их погрешностей — гистерезис, изменение чувствительности при изменении температуры и эффекты трения в шарнирах и осях указателей.

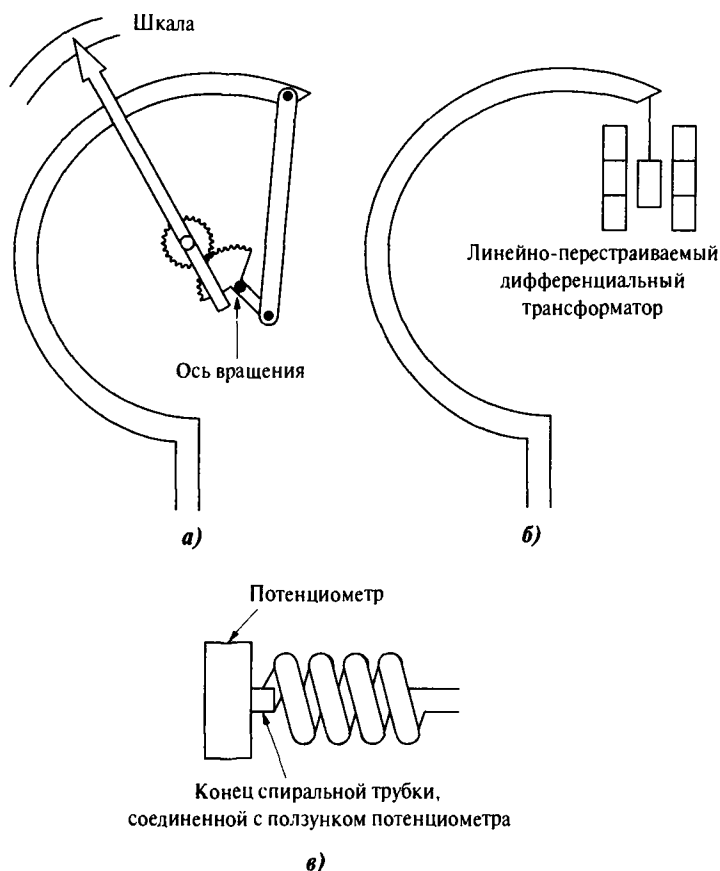


Рис. 18.11. Приборы на трубках Бурдона

Струнно-вибрационные датчики давления

Частота f собственных колебаний натянутой струны определяется формулой:

$$f = \frac{1}{2L} \left(\frac{T}{m} \right)^{1/2},$$

где T — натяжение проволоки, L — длина ее колеблющейся части, m — масса на единицу длины. В струне возбуждаются колебания от возбудителя, питаемого генератором колебаний. Частота колебаний настраивается по вибрациям с максимальной амплитудой. Эти колебания струны воспринимаются каким-либо датчиком, например датчиком переменного магнитного сопротивления. Частота колебаний, таким образом, является мерой натяжения струны. Требуется интервал времени порядка 1 с для точного измерения частоты колебаний струны.

12. Диафрагменный датчик

Струна натянута между фиксированным зажимом и центром диафрагмы (Рис. 18.12). Перемещение диафрагмы вследствие изменения давления приводит к изменению натяжения струны. Верхний предел типичного диапазона измерения давления этим методом равен 180 кПа. Точность измерения составляет $\pm 0.2\%$.

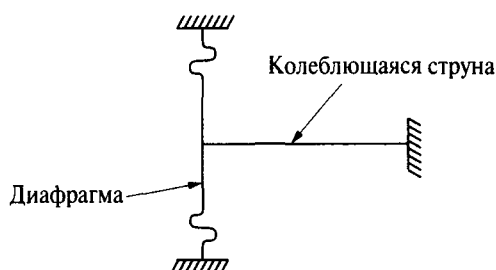


Рис. 18.12. Струнный вибрационный датчик давления диафрагменного типа

13. Датчик Бурдона

Перемещение конца С-образной трубки Бурдона может быть использовано для изменения натяжения растянутой струны, а следовательно, и частоты ее собственных колебаний. Другой тип таких приборов использует спиралевидную трубку Бурдона. В этом случае вращение конца такой трубки при изменении давления в ней используется для воздействия на натяжение натянутой струны (Рис. 18.13). Диапазон измерения и точность таких датчиков соответствует аналогичным значениям для манометров Бурдона.

Пьезоэлектрические датчики давления

Пьезоэлектрический эффект описан в пункте 15 главы 8.

14. Пьезоэлектрический электростатический датчик

Основной элемент пьезоэлектрического датчика — это диафрагма, которая давит на пьезоэлектрический кристалл. Перемещение диафрагмы вызывает сжатие кристалла, которое приводит к возникновению разности электрических потенциалов на



Рис. 18.13. Струнный датчик на основе трубки Бурдона

его плоскостях. Обычно такие датчики используются для измерения давления в диапазоне 200 кПа...100МПа. Их рабочая полоса частот составляет 5 Гц...500 кГц. Такие датчики не могут применяться для измерения статического давления.

Тарировка датчиков давления

Тарировка датчиков давления может быть выполнена при помощи манометра или грузопоршневого устройства (**Рис. 18.14**). В последнем случае давление создается в жидкости при помощи поршня, перемещаемого винтовым устройством. Давление определяется весом грузов на платформе при удержании последней на постоянной высоте. Если полная масса платформы и грузов равна M , то их вес составляет Mg . Если площадь поперечного сечения поршня платформы равна A , то создаваемое в жидкости давление составляет Mg/A .

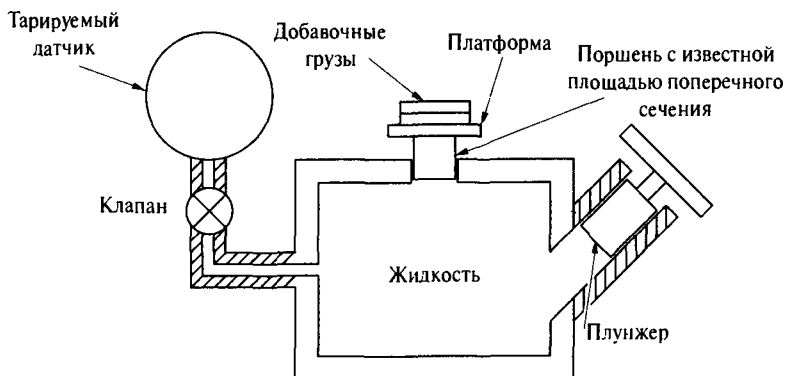


Рис. 18.14. Грузопоршневой манометр

19. ИЗЛУЧЕНИЕ¹

Детекторы излучения используются для определения и измерения излучения, испускаемого радиоактивными материалами и производимого ускорителями заряженных частиц, включая α -частицы, β -частицы и γ -лучи, а также множество других частиц. В Табл. 19.1 приведен список и основные характеристики приборов, обсуждаемых в этой главе.

Табл. 19.1. Детекторы излучений

Принцип действия	Система	Характеристики
Газовые детекторы	1. Ионизационная камера	Выдает текущие показания, высокая точность, может использоваться как портативный прибор
	2. Счетчик Гейгера	Регистрирует отдельные ионизирующие частицы
Сцинтилляция	3. Сцинтилляционный счетчик	Регистрирует отдельные частицы, вид излучения определяется типом используемого сцинтиллятора
Фоторегистрация	4. Пленочный дозиметр	Измеряет дозу
Термолюминесценция	5. Термолюминесцентный дозиметр	Измеряет дозу, многократного использования

Дополнительная литература: Noltingk B. E. (ed.) (1987), *Jones Instrument Technology*, vol.3, *Electrical and Radiation Measurements*, Butterworth-Heinemann.

Газовые детекторы

1. Ионизационная камера

Ионизационная камера — это камера, заполненная газом (часто воздухом), которая содержит два электрода, обычно цилиндрический катод с центральным проволочным анодом или пару параллельных пластин. Когда излучение проникает в камеру, газ ионизируется. Если разность потенциалов между электродами мала, то многие ионы рекомбинируют до того, как они достигнут электродов. При увеличении разности потенциалов рекомбинация уменьшается до тех пор, пока напряжение не станет таким, при котором все ионы будут доходить до электродов без рекомбинации. Этот предел и является рабочим напряжением камеры, при котором ток ионизации составляет порядка $10^{-15} \dots 10^{-10}$ А. По величине этого тока можно определить скорость образования ионных пар в газе камеры. Возможная точность измерения этого метода составляет порядка 0.1%, здесь выходной сигнал незначительно искажается под влиянием энергии излучения.

¹ Излучение относится к радиоактивному или ионизирующему, которое имеет место при радиоактивном распаде (*прим. ред.*).

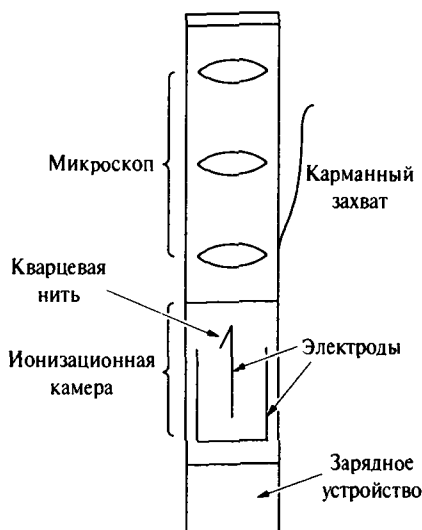


Рис. 19.1. Портативный дозиметр

Возможно использование ионизационной камеры в качестве персонального дозиметра. Два электрода образуют конденсатор, который заряжается разностью потенциалов до требуемого уровня напряжения. Электроды затем отключаются от источника напряжения. Ток ионизации, возникающий в результате прошедшего в камеру излучения, разряжает конденсатор, и по величине потери заряда на нем за период времени определяют общее количество ионных пар, образованных за это время. На **Рис. 19.1** показано устройство *портативного дозиметра*. Такой дозиметр имеет центральный проволочный электрод, расположенный внутри цилиндрического электрода. Электроды заряжаются до нужного уровня напряжения, когда дозиметр вставляется во внешнее зарядное устройство. Наличие заряда на центральном электроде определяется при помощи кварцевой нити, прикрепленной к одному из концов этого электрода. Чем больше заряд на электроде, тем больше отклоняется нить, величина отклонения нити определяется по шкале.

2. Счетчик Гейгера

Если напряжение между парой электродов продолжать увеличивать выше значения, при котором будут собраны все ионы, то электроны приобретут такую скорость, что их энергия станет достаточной для дальнейшей ионизации газа. При достаточном напряжении на электродах энергии электронов, возникших в результате вторичной ионизации, может хватить для продолжения процесса ионизации газа. Этот «лавинный» процесс ионизации ударами электронов может увеличить первоначальную ионизацию в $10^3 \dots 10^5$ раз. Когда коэффициент умножения составляет порядка $10^3 \dots 10^4$, величина импульса тока от одиночного про-

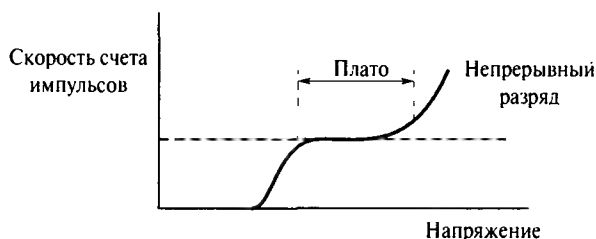


Рис. 19.2. Характеристика счетчика Гейгера

цесса ионизации пропорциональна энергии частицы, вызвавшей начало ионизации. Счетчик, работающий в данном диапазоне, называется **пропорциональным счетчиком**. При большем коэффициенте умножения величина импульса выходного тока становится независимой от энергии частицы, инициирующей ионизацию. Этот диапазон и используется для **счетчика Гейгера**. Эти приборы называются счетчиками потому, что регистрируемые импульсы связаны с одиночными ионизирующими частицами. В режиме измерений напряжение на электродах счетчика Гейгера увеличивается до тех пор, пока его показания не выйдут на некоторое «плато» (**Рис. 19.2**) и становятся практически независимыми от напряжения. После этого рабочее напряжение счетчика устанавливается на уровне, приблизительно соответствующем середине «плато», для того чтобы флуктуации напряжения не влияли на показания прибора.

На **Рис. 19.3** показана принципиальная схема счетчика Гейгера, который представляет собой трубчатую конструкцию из стекла или металла с центральным проволочным анодом и внешним цилиндрическим катодом, который либо выполнен тоже из металла, либо покрыт слоем проводящего материала с внутренней стороны. Окно счетчика Гейгера должно соответствовать типу и энергии исследуемого излучения. Таким образом, для α -частиц и низкоэнергетических β -частиц требуется очень тонкое окно. Трубка Гейгера обычно наполнена аргоном при давлении, равном 10 кПа, с добавлением хлора или паров брома, действующих как гасящие реагенты. От ударов электронов атомы этих веществ распадаются, поглощая при этом энергию и ограничивая время про-

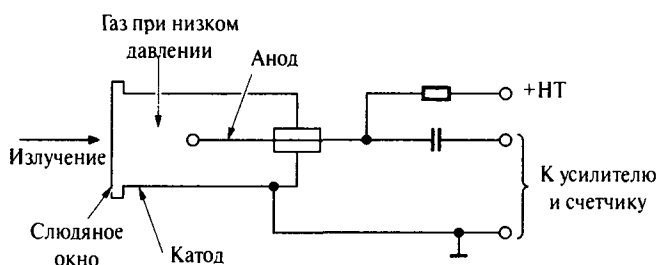


Рис. 19.3. Счетчик Гейгера

должения «лавинового» эффекта. Величина выходного импульса напряжения составляет порядка 1 В. Между началом «лавинового» процесса в трубке под действием одной частицы и моментом времени, когда другая ионизирующая частица может инициировать новую «лаvinу» зарядов, существует некоторый интервал времени. Этот временной интервал называется «мертвым» временем, которое обычно равно порядка 100 мкс. Необходимо вводить поправку на показания R счетчика Гейгера, учитывающую потери счета в течение этого «мертвого» времени τ . Таким образом,

$$\text{Истинное значение счета} = \frac{R}{1 - R\tau}.$$

Сцинтилляционные счетчики

3. Сцинтилляционный счетчик

Основными элементами сцинтилляционного счетчика являются: сцинтиллятор, фотоумножитель и усилитель (**Рис. 19.4**). Когда ионизирующая частица проходит сквозь сцинтиллятор, она вызывает вспышку света. Такие вспышки детектируются и усиливаются фотоумножителем, после усиления электронным усилителем на выходе прибора появляются импульсы, которые могут быть подсчитаны. Фотоумножитель (см. пункт 18 главы 8 и **Рис. 8.206**) — это трубка, попадая в которую, свет падает на светочувствительный катод, в результате чего катод начинает испускать электроны. Эти электроны затем ускоряются при помощи разности потенциалов, приложенной к другому электроду, увеличивая таким образом число электронов вторичной эмиссии. Число ускоряющих электродов, приводящих к увеличению числа электронов, можно довести до десяти. В качестве сцинтиллятора можно использовать:

— неорганический кристалл, например иодид натрия с добавлением иодида таллия (формулу этого соединения обозначают так: NaI (Tl));

— органический кристалл, например антрацен, пластифицированный небольшим количеством других материалов;

— жидкий раствор, в котором радиоактивный образец непосредственно смешан с жидким сцинтиллятором.

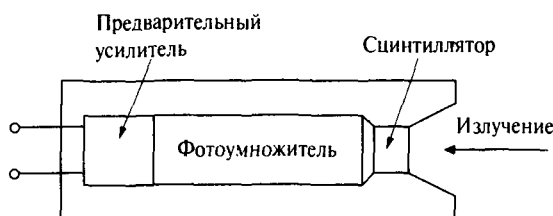


Рис. 19.4. Сцинтилляционный счетчик

Выбор сцинтиллятора определяется типом и энергией излучения, которое необходимо зарегистрировать. Другой фактор, который требуется учитывать, — это время затухания светового импульса, т.е. продолжительность свечения, которая определяет предельную частоту счета для данного сцинтиллятора. Широко распространенный кристалл Na I (Tl), выдающий выходной световой импульс, пропорциональный энергии излучения, используется для определения γ -излучения и рентгеновских лучей. Для регистрации α -частиц часто применяется кристалл Cs I (Tl). При соответствующем выборе сцинтиллятора счетчик может быть использован для измерений альфа-, бета-, гамма-, рентгеновских лучей и нейтронного излучения. В частности, применительно к регистрации гамма- и рентгеновских лучей эффективность использования таких счетчиков приближается к 100%.

Фоторегистрация излучения

Ионизирующее излучение вызывает потемнение фотоэмульсии после проявления пленки. Этот эффект может быть использован для обнаружения ионизирующих частиц и регистрации их треков, так как в местах прохождения этих частиц происходит потемнение фотоэмульсионного слоя.

4. Пленочный дозиметр

На Рис. 19.5 показаны составные элементы пленочного дозиметра. Слои фотоэмульсии с разной чувствительностью нанесены на целлюлозно-ацетатную основу с двух противоположных сторон. Оценить энергию и тип излучения позволяет пленка, частично покрытая фильтрами, состоящими из различных

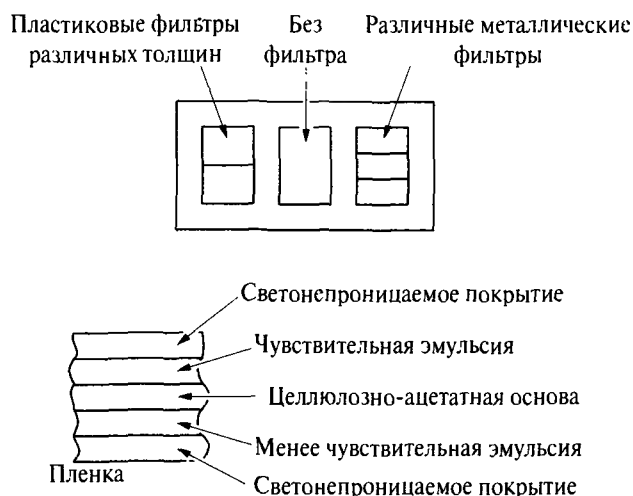


Рис. 19.5. Пленочный дозиметр

материалов с разными толщинами. Таким образом, степень потемнения пленки под фильтрами может быть сравнена со степенью потемнения в местах, где фильтров не было. Например, большая разность в потемнении фотоэмульсии позволяет предположить наличие низкоэнергетических видов излучения, в то время как высокоэнергетические виды излучения должны давать небольшую разницу.

Термолюминесцентные датчики

Когда излучение проходит через некоторые материалы, например такие, как флуоресцентные составы с солями лития или кадмия, некоторая часть энергии излучения захватывается их атомами. Запасенная энергия высвобождается в форме видимого света при последующем нагревании этих материалов. Эффект известен как *термолюминесценция*.

5. Термолюминесцентный дозиметр

Дозиметр такого типа состоит из литиевого флуоресцентного состава, нанесенного на полоску из пластика. После экспозиции дозиметр зажимают между нагревателем и фотоумножителем. При нагревании регистрируется частота импульсов, которая соответствует энергии исследуемого излучения. Такие дозиметры могут быть использованы многократно.

20. НАПРЯЖЕНИЕ И ДЕФОРМАЦИЯ

Растягивающее и сжимающее **напряжение** определяется как сила, действующая на единицу площади поперечного сечения материала, которая приводит к увеличению или уменьшению длины. **Деформация** определяется как изменение длины на единицу длины. Единицей измерения напряжения является **Паскаль (Па)**, а деформация, будучи отношением, не имеет размерности. Обычно делаются измерения деформации, а напряжение выводится из них. В **Табл. 20.1** дан список методов измерения деформации, которые описываются в данной главе, и их основные характеристики.

Табл. 20.1. Измерение деформаций

Принцип	Система	Характеристики
Экстензометр	1. Хагенбергера	Используется система рычагов для получения высокого усиления
	2. Джохансона	Используется закрученная металлическая лента для получения большого усиления
Тензодатчики	3. Сопротивление	Деформация измеряется на малой базе. Требуется температурная компенсация
	4. Вибрационная	Большая длина базы, высокая стабильность. Используется для измерения внутренних напряжений в бетоне
Измерения по полной поверхности	5. Хрупкий лак	Используется для определения направления и локализации максимальных напряжений
По фотоупругости	6. Муаровые полосы	Часто применяется для больших деформаций
	7. Фотоупругость	Используется для моделей из определенных материалов для изучения полей деформаций

Дополнительная литература: Noltingk B. E. (ed.) (1985), *Jones' Instrument Technology*, vol. 1, *Mechanical Measurement*, Butterworth-Heinemann; Holister G. S. (1967), *Experimental Stress Analysis, Principles and Methods*, Cambridge University Press.

Экстензометры (измерители расширения)

Экстензометры используются для прямого измерения изменения длины для датчиков длины и, таким образом, измеряют очень малые перемещения.

1. Экстензометр Хагенбергера

Этот экстензометр (**Рис. 20.1**) использует систему рычагов, обеспечивающих высокое усиление, часто 2000 и больше. Расширение образца между двумя точками измерения создает вращение первого рычага относительно точки его опоры. Так как вход первого рычага очень близок к точке вращения, а выход находится на конце большого рычага, то большое усиление вход-

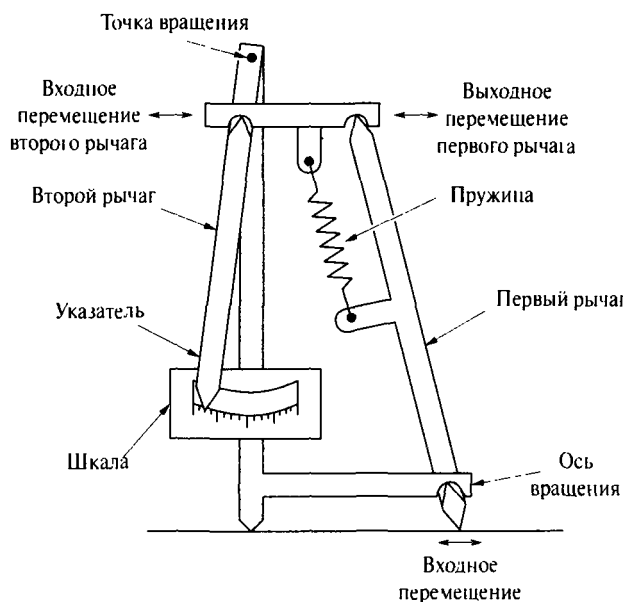


Рис. 20.1. Экстензометр Хагенбергера

ного перемещения передается на второй рычаг тоже в точке, близко расположенной к оси его вращения. Выходным сигналом от этого рычага является движение стрелки по шкале прибора.

2. Экстензометр Джохансона

Основой этого экстензометра (**Рис. 20.2**) является закрученная металлическая лента. Когда материал расширяется, свободный ножевой конец поворачивается и изменяет степень закрутки металлической ленты. В результате стрелка двигается по шкале. Закрученная лента способна давать усиление около 5000.

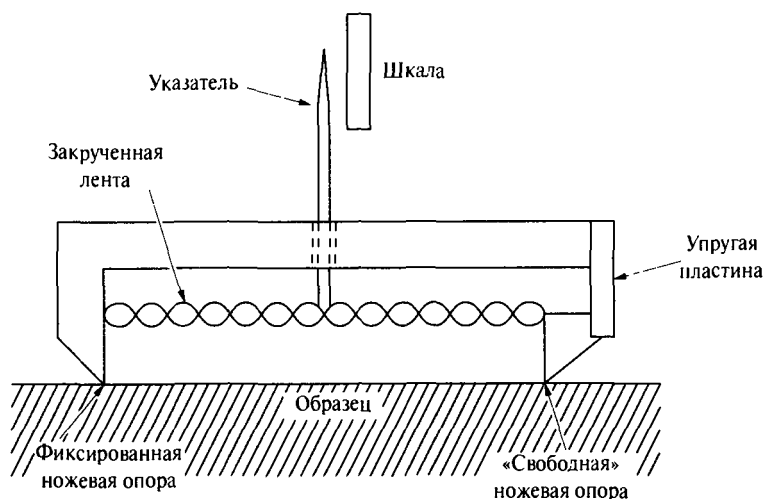


Рис. 20.2. Экстензометр Джохансона

Тензометры

3. Электрический тензорезистор

Электрический тензорезистор (см. пункт 3 главы 8 и **Рис. 8.3**) приклеивается к поверхности испытываемого материала так, что при деформации его поверхности тензодатчик подвергается той же деформации. Эта деформация приводит к изменению сопротивления δR тензодатчика:

$$\frac{\delta R}{R} = G \times \text{деформация},$$

где R — начальное сопротивление тензорезистора, G — постоянная величина для данного датчика, называемая тензометрическим коэффициентом. Для большинства металлических проволок или фольги, используемых для изготовления тензорезисторов, этот коэффициент примерно равен 2. Он определяется производителем тензорезисторов по калибровке, проведенной на партии тензорезисторов. Такая калибровка может включать наклеивку тензорезисторов на испытываемый образец, подвергаемый растяжению, с определением деформации с помощью экстензометра. Другой метод заключается в использовании четырехточечного изгиба балки, к которой приклеены тензометры (**Рис. 20.3**). При этом определяется радиус кривизны R балки по измерениям ее прогиба в средней точке и расстоянию y от тензорезистора до нейтральной оси балки. Важно при этом учесть толщину подложки тензорезистора и клеевого слоя. Тогда:

$$\text{Деформация} = \frac{y}{R}.$$

Изменения температуры могут создать такие же изменения сопротивления тензорезистора, что и деформация. Эффекты влияния температуры можно компенсировать применением холостого датчика, который представляет собой этот тензорезистор, смонтированный на таком же материале, и который не подвергается деформации, а просто расположен вблизи активного тензорезистора так, что на него действуют те же температурные

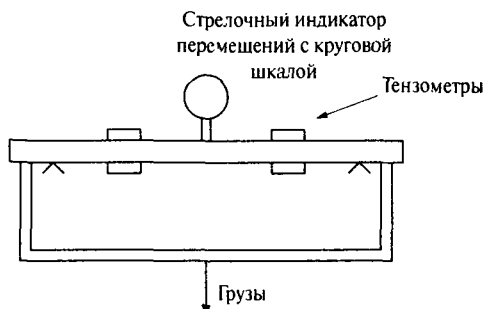


Рис. 20.3. Калибровка датчиков деформации

изменения. Активный и холостой датчики включены в соседние плечи моста Уитстона (см. пункт 3 главы 9 и **Рис. 9.5**). Таким образом компенсируются эффекты температурных изменений.

Для некоторых материалов возможна температурная самокомпенсация. Материал датчика выбирается так, чтобы изменения его сопротивления с температурой компенсировали эффекты термического расширения материала, на котором этот датчик смонтирован.

Датчики деформации измеряют деформацию в направлении длины проволочного или фольгового элемента датчика. Если существуют одноосные напряжения, тензорезистор располагают вдоль этих осей. Тогда:

$$\text{Напряжение} = E \times \text{деформация},$$

где E — модуль упругости материала, к которому прикреплен датчик. Однако тензорезистор, расположенный на поверхности под прямым углом к этим одноосным напряжениям, также показал бы деформацию вопреки, казалось бы, отсутствию напряжений в этом направлении, величина которой была бы равна:

$$\text{Поперечная деформация} = -\nu \times \text{продольная деформация},$$

где ν — коэффициент Пуассона.

Если напряжение на поверхности является двухосным, действуют главные напряжения одновременно в двух взаимно перпендикулярных направлениях. В этом случае требуется установка двух тензорезисторов под прямым углом друг к другу и ориентированных по направлениям главных напряжений:

$$\text{Напряжение в направлении } x = \frac{E(\epsilon_x + \nu\epsilon_y)}{1 - \nu^2},$$

$$\text{Напряжение в направлении } y = \frac{E(\epsilon_y + \nu\epsilon_x)}{1 - \nu^2},$$

где ϵ_x — деформация в направлении x , ϵ_y — в направлении y , E — модуль упругости, ν — коэффициент Пуассона. Если направления главных напряжений неизвестны, необходимо использовать три тензорезистора, расположенных розеткой (**Рис. 20.4**). Если датчики ориентированы под углами 45° и 90° друг к другу, то главные деформации ϵ_x и ϵ_y связаны с деформациями $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$, измеряемыми тремя датчиками как:

$$\epsilon_1 = \left(\frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} \right) + \left(\frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \right) \cos 2\theta,$$

где θ — угол между направлениями ϵ_1 и ϵ_y .

$$\epsilon_2 = \left(\frac{\epsilon_x + \epsilon_y}{2} \right) + \left(\frac{\epsilon_x - \epsilon_y}{2} \right) \cos 2(\theta + 45^\circ),$$

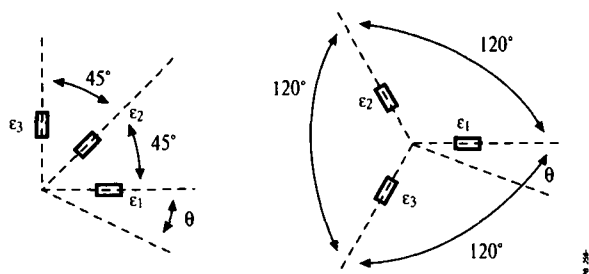


Рис. 20.4. Розетки расположения датчиков деформации

$$\varepsilon_3 = \left(\frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} \right) + \left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \right) \cos 2(\theta + 90^\circ).$$

Если углы между датчиками составляют 120° , то:

$$\varepsilon_1 = \left(\frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} \right) + \left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \right) \cos 2\theta,$$

$$\varepsilon_2 = \left(\frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} \right) + \left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \right) \cos 2(\theta + 120^\circ),$$

$$\varepsilon_3 = \left(\frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} \right) + \left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \right) \cos 2(\theta + 240^\circ).$$

Главные напряжения могут быть потом рассчитаны по этим главным деформациям и уравнениям, приведенным ранее.

Дополнительная литература: Holister G. S. (1983), *Experimental Stress Analysis*, Cambridge Engineering Services; Window A. L. and Holister G. S. (1982), *Strain Gauge Technology*, Allied Science Publishers.

4. Датчик на принципе вибрирующей струны

Струна, натянутая между двумя опорами, будет свободно колебаться с собственной частотой f в соответствии с выражением:

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{m}},$$

где L — длина вибрирующей струны, T — натяжение струны, m — ее масса на единицу длины. Так как проволока струны подчиняется закону Гука, то натяжение может быть рассчитано как:

$$T = k\delta L,$$

где δL — удлинение, на которое струна была растянута, а k — постоянная величина. Если конец струны соединен с материалом, подвергаемым деформации, то и L , и T будут изменены, и, таким образом, частота f может использоваться как мера деформации.

Амплитуда вибрирующей струны воспринимается приемной катушкой, если струна выполнена из ферромагнитного материала. Одновременно определяется частота этих колебаний. Такой датчик (**Рис. 20.5**) имеет достаточно большие габариты, порядка 100 мм, и характеризуется хорошей стабильностью. Он применяется для измерения, в частности, внутренних деформаций в бетоне.

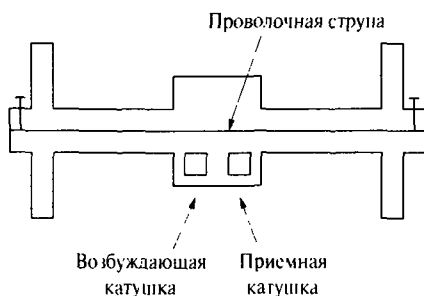


Рис. 20.5. Вибрационный датчик деформаций

Измерение деформаций на полной поверхности

5. Хрупкие лаки

Поверхность испытываемого образца покрывается специальным лаком. Когда лак высыхает, он становится хрупким. Когда такой испытываемый образец нагружается, появляются трещины в местах, где деформация превышает некоторое критическое значение. Трещины образуются под прямым углом к направлению максимальных главных напряжений, и, таким образом, расположение трещин показывает локализацию наибольших напряжений на образце. Метод чаще всего используется для определения направления главных напряжений. Его точность по количественному определению этих напряжений очень низкая.

6. Муаровые полосы

Набор линий гравировается на поверхности испытываемого образца. Прозрачная гравировка с тем же количеством линий на единицу длины подносится к испытываемому образцу, и через нее рассматривается поверхность образца. Появляется картина муаровых полос, которая изменяется, когда испытываемый образец подвергается деформации. При этом меняется также расположение муаровых полос.

Измерение напряженных состояний методом фотоупругости

Луч света может рассматриваться как распространяющаяся волна, которая может иметь плоскости колебаний в разных направлениях, расположенных под прямым углом к направлению распространения, т.е. это поперечная волна. Обычно свет состо-

ит из волн с многочисленными плоскостями колебаний. Если волна ограничена только одной плоскостью колебаний, то говорят о плоской поляризации.

7. Фотоупругость

Фотоупругость — это метод определения напряжений в образцах, выполненных из определенных материалов, например таких, как плексиглас. Такие материалы обладают свойством, называемым *двойным лучепреломлением*. Если плоскость света проходит через такой материал, то при возникновении напряжений в материале свет расщепляется на две плоскополяризованные составляющие. Они имеют свои плоскости колебаний, ориентированные под прямыми углами друг к другу вдоль направлений главных напряжений. Скорость распространения каждой составляющей пропорциональна величине напряжения в плоскости колебания. Таким образом, проходя через напряженный материал, волны имеют сдвиг фаз, если напряжения различны. Когда волны выходят из образца, они складываются, создавая интерференционные полосы (**Рис. 20.6**).

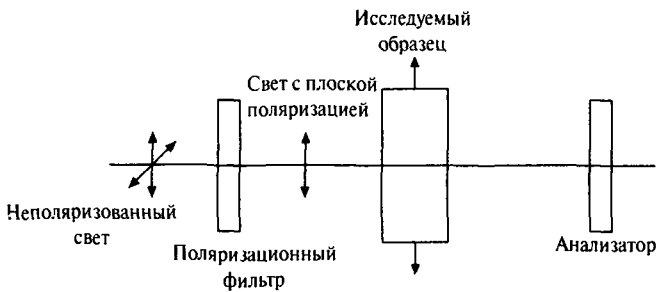


Рис. 20.6. Метод фотоупругости

Когда два главных напряжения равны нулю, волны имеют нулевой сдвиг фаз. Если различие в напряжениях таково, что сдвиг фаз между волнами достаточно велик, возникает темная интерференционная полоса. Первая полоса имеет порядковый номер 1. Напряжения могут быть, однако, достаточными для дальнейшего фазового расхождения, и это создает интерференционные полосы высших порядков.

$$\text{Разница главных напряжений} = nf / t,$$

где n — порядковый номер интерференционной полосы, t — толщина образца, f — постоянная материала. Таким образом, определяя порядковый номер интерференционной полосы в точке, можно получить разницу в величинах главных напряжений. Одним из способов сделать это является подсчет количества полос, оказавшихся между рассматриваемой точкой и местом в образце с нулевыми напряжениями.

21. ТЕМПЕРАТУРА

В Табл. 21.1 приведены системы температурных измерений, обсуждаемые в данной главе, и их характеристики.

Табл. 21.1. Системы температурных измерений

Принцип	Система	Характеристики
По расширению	1. Биметаллическая пластина	Может применяться для термостатов, диапазон измерения $-30 \dots 600^\circ \text{C}$, точность $\pm 1\%$, прочные
	2. Жидкость в стеклянных трубках	Непосредственное измерение, диапазон зависит от используемой жидкости. Для ртути $-35 \dots 600^\circ \text{C}$, спирта $-80 \dots 70^\circ \text{C}$, пентана $-200 \dots 30^\circ \text{C}$. Обычная точность $\pm 1\%$
	3. Жидкость в металлических трубках	Диапазон зависит от жидкости, в пределах $-90 \dots 650^\circ \text{C}$. Например, для ртути $-39 \dots 650^\circ \text{C}$, точность $\pm 1\%$, прочные, дистанционные измерения
	4. Газ в металлических конструкциях	Диапазон $-100 \dots 650^\circ \text{C}$, точность ± 0.5 , прочные, дистанционные измерения
	5. Давление паров	Диапазон измерения $0 \dots 250^\circ \text{C}$, точность $\pm 1\%$
По сопротивлению	6. Металлические проводники	Диапазон измерения зависит от металла. Для платины $-200 \dots 850^\circ \text{C}$, никеля $-80 \dots 300^\circ \text{C}$, меди $-200 \dots 250^\circ \text{C}$. Точность измерения для платины $\pm 0.5\%$
	7. Термистор	Нелинейность, диапазон $-100 \dots 300^\circ \text{C}$. Быстрое реагирование
Термоэлектрический	8. Термопара	Диапазон, чувствительность, точность зависят от металлов, используемых для изготовления термопар. Например, для пары железо—константан в диапазоне $-180 \dots 760^\circ \text{C}$ чувствительность 53 мкВ/ $^\circ \text{C}$, точность $\pm 1 \dots 3\%$. Для пары платина—платина/13% родий в диапазоне $0 \dots 1750^\circ \text{C}$ чувствительность 6 мкВ/ $^\circ \text{C}$ при точности $< \pm 1\%$
Пирометр	9. Исчезающая нить накала	Диапазон $600 \dots 3000^\circ \text{C}$, точность $\pm 0.5\%$. Отсутствует физический контакт с нагретым объектом
	10. Излучение	Диапазон $0 \dots 3000^\circ \text{C}$, точность $\pm 0.5\%$. Отсутствует физический контакт с нагретым объектом
	11. Двухцветная	Диапазон $0 \dots 3000^\circ \text{C}$, точность $\pm 0.5\%$, нет физического контакта с нагретым объектом

Дополнительная литература: Noltingk В. Е. (ed.) (1985), *Jones' Instrument Technology*, vol. 2, *Measurement of Temperature and Chemical Composition*, Butterworth-Heinemann.

Международная техническая шкала температур использует несколько фиксированных точек, для которых приводятся численные величины и указывается, какие термометры должны

применяться для определения температуры в интервалах между фиксированными точками (Табл. 21.2). Температуры на этой шкале могут выражаться двумя способами: или в градусах Цельсия ($^{\circ}\text{C}$) или в Кельвинах (K).

$$\text{Температура в K} = \text{температура в } ^{\circ}\text{C} + 273.15$$

Табл. 21.2. Фиксированные точки международной технической шкалы температур

Фиксированная точка	Температура		Интерполяционный термометр
	$^{\circ}\text{C}$	K	
Тройная точка водорода	- 259.34	13.81	Платиновый термометр сопротивления
Точка кипения водорода при давлении 33330.6 Па	- 255.478	17.042	
Точка кипения водорода	- 252.24	20.28	
Точка кипения неона	- 246.048	27.102	
Тройная точка кислорода	- 218.789	54.361	
Тройная точка аргона	- 193.352	83.798	
Точка кипения кислорода	- 186.962	90.188	
Тройная точка воды	0.01	273.16	
Точка кипения воды	100	373.15	Платиновый термометр сопротивления
Точка отверждения олова	231.9681	505.1181	
Точка отверждения цинка	419.58	692.73	Термопара
	630.74	903.89	
Точка отверждения золота	1064.43	1337.58	Радиационный пирометр
		выше	

Примечание.

Выше приведены только первичные фиксированные точки. Кроме них существуют вторичные фиксированные точки для дополнительного применения внутри интервалов между первичными фиксированными точками. Все точки кипения, кроме отмеченных, приведены при условии нормального атмосферного давления, т.е. 101325 Па. Тройная точка — это температура, при которой твердое, жидкое и газообразное состояния сосуществуют вместе. В диапазоне ниже 0°C зависимость между сопротивлением и температурой для платинового термометра устанавливается с применением известных функций и специальных поправок к уравнениям. Выше температуры 0°C применяются два полиномиальных уравнения для платинового термометра сопротивления. Квадратичная аппроксимация используется для термопары плагина — платина/10% родий, а для радиационного пирометра применяется закон излучения Планка.

Термометры, использующие эффект расширения материалов

1. Биметаллические пластинки

Биметаллические пластинки состоят из двух различных металлических пластинок одной длины, соединенных вместе. Так как металлы имеют различные коэффициенты термического расширения, то изменение температуры приводит к изгибу пла-

стинки, так что металл с большим коэффициентом расширения окажется на внешней стороне кривизны. Величина, на которую пластинка изогнется, зависит от типа двух используемых металлов, длины биметаллической пластинки и изменения температуры. Если один конец биметаллической пластинки зафиксирован, то величина перемещения другого ее конца является мерой температуры. Это перемещение может быть использовано для замыкания или замыкания контактов электрических цепей, как это показано на **Рис. 21.1** на примере простого термостата, применяемого во многих системах бытового обогрева.

Так как увеличение длины биметаллической полоски увеличивает перемещение, биметаллические термометры обычно выполняются в виде полоски спиральной формы (**Рис. 21.2**). Перемещение свободного конца здесь используется для непосредственного перемещения стрелки по шкале. Приборы с биметалли-

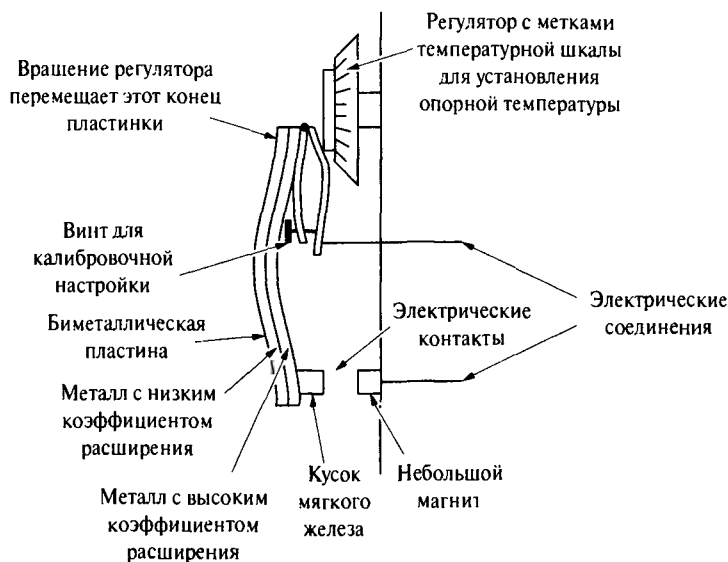


Рис. 21.1. Биметаллический термостат

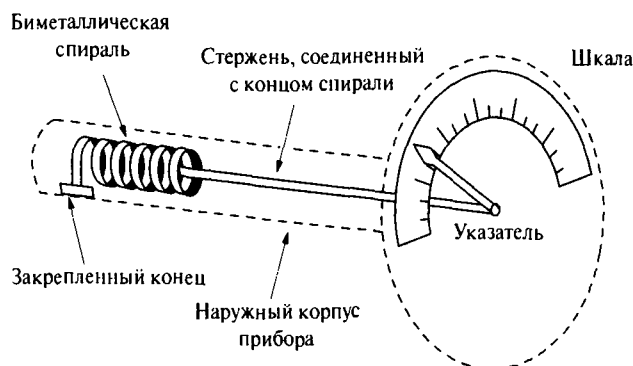


Рис. 21.2. Биметаллический термометр

ческими полосками прочны, относительно дешевы, могут использоваться в диапазоне $-30\ldots 600^{\circ}\text{C}$, а также в термостатах. Они имеют точность $\pm 1\%$, но обладают сравнительно медленной реакцией на изменение температуры.

2. Жидкостные стеклянные термометры

Жидкость, заключенная в стеклянном термометре, расширяется вверх по капиллярной трубке. Такие термометры дают возможность непосредственного считывания измеряемых значений. Они весьма хрупкие, способны давать приемлемую точность при стандартных условиях, обладают достаточно медленной реакцией на изменения температуры, дешевые. Для ртути, как жидкости, диапазон измеряемых температур составляет $-35\ldots 600^{\circ}\text{C}$, спирта $-80\ldots 70^{\circ}\text{C}$, толуола $-80\ldots 100^{\circ}\text{C}$, пентана $-200\ldots 30^{\circ}\text{C}$, креозота $-5\ldots 200^{\circ}\text{C}$. Термометры калибруются для применения с частичным погружением до некоторой отметки на их столбиках, погружения до уровня жидкости в термометрах и полного погружения термометров. Если термометр не погружен до требуемого по калибровке уровня, то будут возникать дополнительные погрешности. Обычно точность таких термометров $\pm 1\%$.

3. Жидкостные металлические термометры

Жидкость в таком термометре заключена в металлическую колбу, соединенную капиллярной трубкой с манометром Бурдона. Когда жидкость при нагревании расширяется, в ней увеличивается давление, которое затем регистрируется датчиком давления типа трубок Бурдона. Для ртути диапазон измерения $-39\ldots 650^{\circ}\text{C}$, для спирта $-46\ldots 150^{\circ}\text{C}$, для ксилена $-40\ldots 400^{\circ}\text{C}$, для эфира $20\ldots 90^{\circ}\text{C}$. Применяются также другие жидкости. В целом диапазон измерения температуры такими приборами составляет $-90\ldots 650^{\circ}\text{C}$. Эти приборы могут использоваться для дистанционных измерений на удалении от термометрической колбы. Точность около $\pm 1\%$.

Источником погрешностей для этого вида термометров является жидкость в соединительной капиллярной трубке, температура которой также воздействует на давление. Ошибка снижается при уменьшении объема соединительной трубки, следовательно, при использовании капиллярных трубок. Другой способ снижения погрешностей — использование еще одной капиллярной трубки, проложенной вдоль главного капилляра, но немного не доходящего до колбы (**Рис. 21.3**). Она соединяется со второй трубкой Бурдона, и стрелка показывающего прибора перемещается уже разностью перемещений обеих трубок Бурдона. Еще один способ заключается в использовании биметаллической пластинки. Последняя соединяется с концом трубки Бурдона и оказывает компенсирующее действие на влияние окружающей температуры на жидкость в капиллярной трубке.

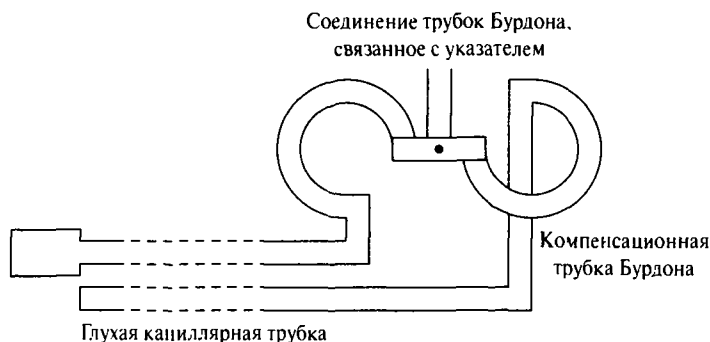


Рис. 21.3. Компенсация влияния окружающей температуры

Другие источники ошибок — это ошибка гидравлического подпора, ошибка от окружающего давления и ошибка степени погружения. Ошибка гидравлического подпора возникает тогда, когда высота термометрической колбы изменена по отношению к трубке Бурдона. Из-за перепада высот жидкости в термометре возникает дополнительное давление. Так как манометр Бурдона измеряет избыточное давление, изменение окружающего давления будет действовать на его показания. Термометрическая колба должна быть полностью погружена для получения правильных показаний.

4. Газовый термометр

Техническая разновидность газового термометра состоит из термометрической колбы, соединенной с манометром Бурдона и заполненной газом, например азотом. Когда температура увеличивается, давление газа растет, и оно измеряется манометром. Колба такого термометра достаточно большая, около $50 \dots 100 \text{ см}^3$. Термометр прочный, имеет диапазон измерений $-100 \dots 650^\circ\text{C}$, позволяет непосредственно считывать показания, но может использоваться и для дистанционных измерений. Его точность около $\pm 0.5\%$ на полную шкалу. Источники погрешностей те же, что и описанные выше в разделе 3. Однако ошибкой гидравлического подпора здесь можно пренебречь.

5. Термометры по давлению пара

Этот термометр состоит из термометрической колбы, соединенной с манометром Бурдона и частично заполненной жидкостью. Пространство над жидкостью содержит только пары этой жидкости. Повышение температуры увеличивает количество испарившейся жидкости и, следовательно, повышает избыточное давление ее паров. Давление пара измеряется манометром Бурдона и является мерой температуры. Зависимость давления от температуры, однако, нелинейная. При использовании в качестве жидкости метилхлорида диапазон измерения $0 \dots 50^\circ\text{C}$, для

диоксида серы — $30...120^{\circ}\text{C}$, диэтилового эфира — $60...160^{\circ}\text{C}$, этанола — $30...180^{\circ}\text{C}$, воды — $120...220^{\circ}\text{C}$, толуола — $150...250^{\circ}\text{C}$. Прибор прочный, позволяет делать как непосредственные, так и дистанционные измерения (лучше, чем жидкостные металлические термометры), но имеют нелинейную шкалу и точность около $\pm 1\%$. Источники погрешностей, в основном, те же, что описаны выше в разделе 3.

Резистивные термометры

6. Металлические резистивные термометры

Сопротивление металлов обычно увеличивается с ростом температуры. Изменение сопротивления пропорционально изменению температуры (см. пункт 1 главы 8). Термометр сопротивления состоит из катушки провода, включенной в цепь, обычно мост Уитстона, для измерения изменения сопротивления. Катушка представляет собой проволочное сопротивление, намотанное на покрытую керамикой трубку. Затем она также покрывается керамикой и монтируется в защитную трубку. Время реакции такого датчика на изменение температуры достаточно велико, часто порядка нескольких секунд, так как нет хорошего теплового контакта между катушкой и средой, температуру которой необходимо измерить. Металлами, которые применяются для изготовления катушек термосопротивлений, являются платина, никель, медь (см. **Рис. 8.1**).

Платина имеет почти линейную зависимость сопротивления от температуры, дает хорошую воспроизводимость, стабильность и обеспечивает точность $\pm 0.5\%$ в диапазоне температур $-200...850^{\circ}\text{C}$. Она относительно инертна и может использоваться в широком диапазоне условий без ухудшения характеристик, но она более дорогая, чем многие другие металлы. Однако это наиболее широко используемый металл. Температурный коэффициент сопротивления α равен около $0.0039/^{\circ}\text{C}$. Никель и медь дешевле, но имеют меньшую стабильность, более подвержены воздействию с окружающей средой и не могут применяться в таком же широком диапазоне температур. Никель имеет температурный коэффициент сопротивления α около $0.0067/^{\circ}\text{C}$ и диапазон измерения $-80...300^{\circ}\text{C}$. Медь имеет температурный коэффициент сопротивления α около $0.0038/^{\circ}\text{C}$ и диапазон измеряемых температур $-200...250^{\circ}\text{C}$.

Проблема применения моста Уитстона состоит в том, что измеряемым сопротивлением будет и сопротивление подводющих проводов. Если температура проводов изменяется, то будет меняться и их сопротивление независимо от того, изменялась ли температура самого датчика. Метод компенсации этого эффекта обсужден в пункте 3 главы 9, см. также **Рис. 9.3** и **Рис. 9.4**.

7. Термистор

Термисторы дают значительно большие изменения сопротивления на градус по сравнению с металлическими проволочными элементами (см. пункт 1 главы 8). Их малые размеры обеспечивают небольшую теплоемкость и, следовательно, малое время реакции на температурные изменения. Температурный диапазон, в котором они могут применяться, зависит от типа термистора и составляет $-100...300^{\circ}\text{C}$. В малых диапазонах изменения температуры может быть достигнута точность 0.1°C или лучше. Однако их характеристики имеют тенденцию изменяться со временем. Для измерения сопротивления термистора может применяться мост Уитстона. Здесь нет необходимости компенсации сопротивления подводющих проводов, так как их сопротивление пренебрежимо мало по сравнению с сопротивлением термистора.

Термометры, использующие термоэлектрический эффект

Термоэлектрический эффект описан в пункте 14 главы 8.

8. Термопары

Смотрите пункт 14 главы 8 для более подробного ознакомления с термопарами. Термопары имеют очень маленькую собственную теплоемкость, что обеспечивает малые переходные времена на изменение температуры. Основные металлические термопары типов E, J, K и T относительно дешевые, имеют точность $\pm 1...3\%$, но подвержены ухудшению характеристик со временем. Термопары из благородных металлов типа R и S более дорогие и имеют точность $\pm 1\%$ или лучше. Они более стабильны и долговечны. В стандартных таблицах приводятся э.д.с. обычно используемых термопар как функции температуры при условии, что один спай находится при 0°C . В пункте 14 главы 8 даны примеры из таких таблиц. Опорный спай термопары обычно поддерживается при 0°C погружением в смесь воды и льда. Альтернативой является последовательное включение с термопарой цепи, которая дает разность потенциалов, компенсирующую температурный уход из-за отличия температуры опорного спая от 0°C . Более подробно такие цепи описаны в пункте 14 главы 8. Э.д.с. термопары может быть измерена непосредственно подключением ее к гальванометру или потенциометрической цепи (как в пункте 8 главы 9) или к электронной схеме, включающей высокоимпедансный усилитель.

Большой выходной сигнал на градус может быть получен при последовательном включении нескольких термопар так, что э.д.с. каждой из них складываются. Такое устройство известно как *термоэлектрическая батарея*.

Пирометры

На **Рис. 21.4** показано, как меняется мощность P_λ излучаемая единицей площади поверхности черного тела, в зависимости от длины волны λ при различных температурах T (в градусах Кельвина). Это распределение описывается **законом Планка**:

$$P_\lambda = \frac{C_1}{\lambda^5 [\exp(C_2 / \lambda T) - 1]},$$

где C_1 и C_2 — постоянные величины.

Полная мощность P излучения на единицу поверхности черного тела при конкретной температуре T является площадью под кривой соответствующего графика, т.е. интегралом вышеприведенного выражения от нуля до бесконечности. Она дается выражением:

$$P = \sigma T^4,$$

где σ — постоянная величина, называемая константой Стефана—Больцмана.

Все приведенное выше относится к черному телу. Такое тело является теоретическим идеалом. Реальные тела излучают меньше энергии при любой конкретной длине волны или температуре. Поэтому требуется вводить поправочный множитель ϵ , называемый степенью черноты:

$$\epsilon = \frac{\text{фактическая энергия излучения при } \lambda \text{ и } T}{\text{энергия излучения черного тела при } \lambda \text{ и } T}.$$

Степень черноты материала зависит от формы поверхности и ее текстуры, ее температуры и длины волны. В **Табл. 21.3** представлены некоторые приближенные ее величины.

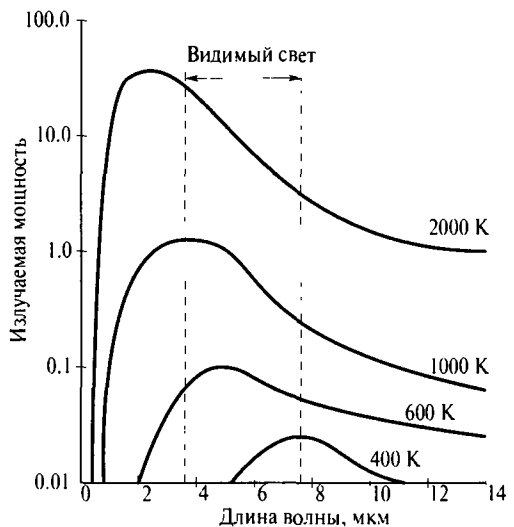


Рис. 21.4. Распределение мощности излучения в зависимости от длины волны

Табл. 21.3. Величины степени черноты

Материал	Условие	Температура [°C]	Степень черноты
Алюминий	Окисленный	600	0.2
Латунь	Окисленная	600	0.6
Чугун литой	Окисленный	600	0.8
Чугун литой	Сильно окисленный	250	0.95
Медь	Окисленная	200	0.6
Шамот		1000	0.6

9. Пирометр с исчезающей нитью

Такие пирометры (Рис. 21.5) работают только в видимой части спектра, излучаемого нагретым объектом. Излучение фокусируется в плоскости нахождения нити накала так, что это излучение и нить накала могут одновременно наблюдаться в фокусе окуляра. Нить накала нагревается электрическим током до тех пор, пока она и нагретый объект остаются видимыми в одном цвете, т.е. когда нить накала исчезает на фоне нагретого объекта. Ток через нить накала является мерой ее температуры. Обычно между окуляром и нитью накала устанавливается красный фильтр для того, чтобы сделать легкосравнимыми для глаза нить накала и нагретый объект. Другой красный фильтр может быть введен между нагретым объектом и нитью накала для того, чтобы объект казался менее нагретым по сравнению с нитью накала, и таким образом расширить диапазон измерения прибора. Пирометр с исчезающей нитью имеет диапазон измерения 600...3000°C при точности считывания около $\pm 0.5\%$. Отсутствует непосредственный физический контакт с горячим объектом. Он может применяться для движущихся и удаленных объектов.

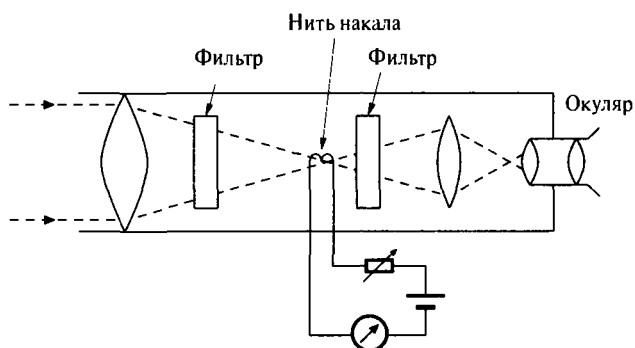


Рис. 21.5. Пирометр с исчезающей нитью

Должны быть введены поправки на степень черноты ϵ нагретого объекта. Истинная температура T объекта связана с видимой температурой T_a , основанной на допущении, что объект является черным телом, при помощи соотношения:

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{T_a} = \frac{\lambda \ln \epsilon}{C_2},$$

где все температуры в градусах Кельвина, λ — длина волны, на которой проведены измерения (обычно 0.65 мкм), C_2 — постоянная величина, равная 1.4388×10^{-2} [мК].

10. Радиационный пирометр

Для радиационного пирометра излучение от объекта фокусируется на приемник излучения (Рис. 21.6). Это может быть **широкополосный датчик** типа термопары, термометра сопротивления и термистора. Широкополосный датчик принимает излучение в широкой полосе частот, и, таким образом, его выходной сигнал является суммой мощностей, излучаемых на каждой длине волны. Он выражается площадью под кривой Рис. 21.4 для конкретной температуры. Следовательно, выход такого приемника пропорционален четвертой степени величины температуры в градусах Кельвина.

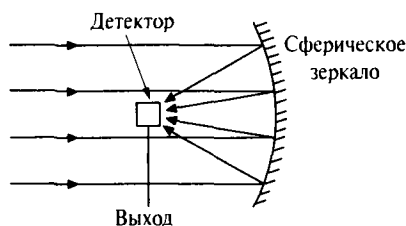


Рис. 21.6. Радиационный пирометр

Альтернативой является **узкополосный приемник, или фотонный детектор**, такой как фотосопротивление или фотоэмиссионные элементы. Они имеют существенно меньшее время реакции (микросекунды, а не миллисекунды) и работают только в узкой полосе длин волн. С ними иногда применяются светофильтры для того, чтобы еще сильнее сузить эту полосу. Выходной сигнал такого приемника пропорционален:

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda^5} \exp(-C_2 / \lambda T),$$

где λ — средняя длина волны полосы пропускания, $\Delta \lambda$ — ширина этой полосы, C_2 — постоянная, T — температура в градусах Кельвина.

В некоторых разновидностях этих приборов используется механический вращающийся диск или заслонка для прерывания излучения перед приемником, чтобы получить выходной сигнал в виде переменного тока. В качестве приемника обычно исполь-

зуется термистор. Модулированные сигналы могут быть усилены и, таким образом, измерены даже в тех случаях, когда уровни излучения от объекта очень низкие.

Точность радиационных пирометров обычно около $\pm 0.5\%$, а диапазон их измерения $0 \dots 3000^\circ\text{C}$ или выше. Для широкополосных приборов переходные времена меняются от 0.1 с, возможные для термопарных приемников, до нескольких секунд для термопар с многими термопарами. Постоянная времени узкополосных приборов составляет несколько микросекунд. Широкополосные приборы с модуляцией луча обычно используют термисторы, так как постоянная времени термопар слишком велика. Для узкополосных приборов можно применять высокие частоты модуляции, так как их приемники имеют малые постоянные времени. Радиационные пирометры успешно используются в тех случаях, когда не должно быть контакта с объектом, температура которого измеряется. Они могут использоваться для объектов, которые слишком горячие для контакта, слишком агрессивные или подвижные. Поправка на степень черноты делается аналогично предыдущему разделу.

11. Двухцветный пирометр

На выходной сигнал радиационных пирометров, описанных выше, влияют изменения степени черноты нагретого объекта и характеристик прозрачности промежуточных сред между объектом и пирометром. Поэтому в каждой конкретной ситуации необходима калибровка пирометра. Эти проблемы не существуют для двухцветного пирометра (Рис. 21.7). Приходящее излучение от объекта расщепляется на два одинаковых луча. Каждый из них затем проходит через узкополосный светофильтр, что позволяет пропускать только узкие полосы длин волн. При этом длины пропускаемых волн для обоих светофильтров различны. Детекторы, стоящие за светофильтрами,

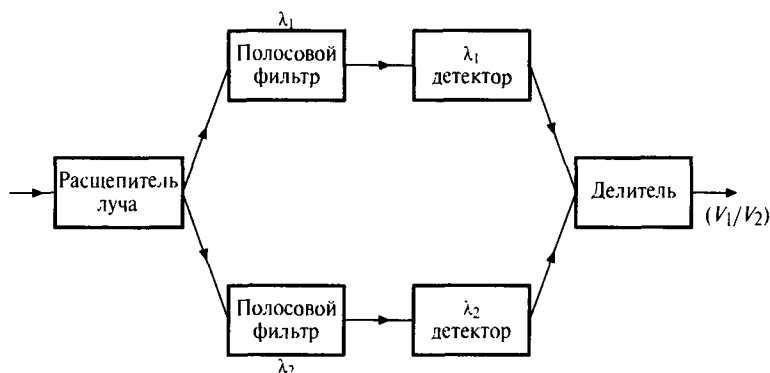


Рис. 21.7. Двухцветный пирометр

определяют мощность излучения двух лучей. Отношение выходных сигналов этих детекторов затем используется как мера температуры объекта.

$$\text{Отношение выходных сигналов} = \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right)^5 \exp \frac{C_2}{T} \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right),$$

где λ_1 и λ_2 — средние длины волн для двух светофильтров, T — температура в градусах Кельвина, C_2 — постоянная. Точность таких приборов обычно $\pm 0.5\%$ в диапазоне $0 \dots 3000^\circ$ или выше. Результаты не зависят от степени черноты объекта.

22. ВАКУУМ

Понятие «вакуум» обычно используется для обозначения давления, величина которого значительно ниже атмосферного (100 кПа). Некоторые системы измерения давления, описанные в главе 18, могут быть использованы при измерении значений давления ниже атмосферного. Манометр с U-образной трубкой сравнивает два давления, и если одно из них является атмосферным, то другое может падать до уровня 1 кПа. Измерительное устройство на основе манометра Бурдона обычно используется для измерения давления до 10 кПа. Мембранные манометры могут быть использованы до 1 кПа. В Табл. 22.1 приведен список измерительных приборов, обсуждаемых в данной главе, которые могут быть использованы для измерений еще более низких давлений.

Табл. 22.1. Системы измерения вакуума

Принцип действия	Система	Характеристики
Закон Бойля—Мариотта	1. Измеритель Маклауда	Диапазон измерений: $5 \times 10^{-4} \dots 5 \times 10^5$ Па, точность: $\pm 5 \dots 10\%$
Теплопроводность	2. Измеритель Пирани	Диапазон измерений: $10^{-2} \dots 10^3$ Па, точность: $\pm 10\%$
	3. Термисторный измеритель	Диапазон измерений: $10^{-2} \dots 10^3$ Па, точность: $\pm 10\%$
	4. Термопарный измеритель	Диапазон измерений: $10^{-1} \dots 10^3$ Па, точность: $\pm 20\%$
Ионизация	5. Газоразрядная трубка	Грубое определение вакуума
	6. Измеритель Пеннинга	Диапазон измерений: $10^{-5} \dots 1$ Па, точность: $\pm 10 \dots 20\%$, существует гистерезис
	7. Измеритель с подогреваемым катодом	Диапазон измерений: $10^{-6} \dots 10^2$ Па, точность: $\pm 10 \dots 30\%$
	8. Измеритель Баярда—Альперта	Диапазон измерений: $10^{-8} \dots 1$ Па, точность: $\pm 10 \dots 30\%$

Дополнительная литература: Leck J. H., *Pressure Measurement in Vacuum Systems*, Institute of Physics; Noltingk B. E. (ed.) (1987), *Jones Instrument Technology*, vol. 3, *Electrical and Radiation Measurements*, Butterworth-Heinemann.

Измерители, основанные на законе Бойля—Мариотта

При неизменной массе идеального газа давление будет всегда пропорционально занимаемому этим газом объему. Таким образом, при сжатии газа от одного известного объема до другого известного меньшего объема давление будет расти пропорционально отношению величин этих объемов, и это отношение можно сделать достаточно большим для упрощения процедуры измерений.

1. Измеритель Маклауда

В начальный момент в измерителе Маклауда (Рис. 22.1) уровень ртути находится в положении *A*, которое соответствует измеряемому давлению газа в баллоне (круглой части измерителя). Затем из-за нагнетания воздуха в резервуар с ртутью уровень ртути начинает расти. Когда ртуть пересечет уровень положения *B*, то в баллоне останется перекрытым некоторое количество газа. Уровень ртути продолжает расти до тех пор, пока не достигнет положения *C*, при котором уровень ртути в открытом капилляре будет равен уровню верхней части капилляра, соединенного с перекрытым объемом газа. После этого производится измерение давления p , которое будет соответствовать разности высот h между уровнями ртути в двух капиллярных трубках. Если объем отсеченного газа V сжать до объема hA (A — это площадь поперечного сечения капиллярной трубки), то давление увеличится на величину $h\rho g$ (ρ — это плотность ртути; g — это ускорение свободного падения). Таким образом, используя закон Бойля—Мариотта, можно записать:

$$pV = (p + h\rho g)hA.$$

Следовательно,

$$p = \frac{Ah^2\rho g}{V - Ah}.$$

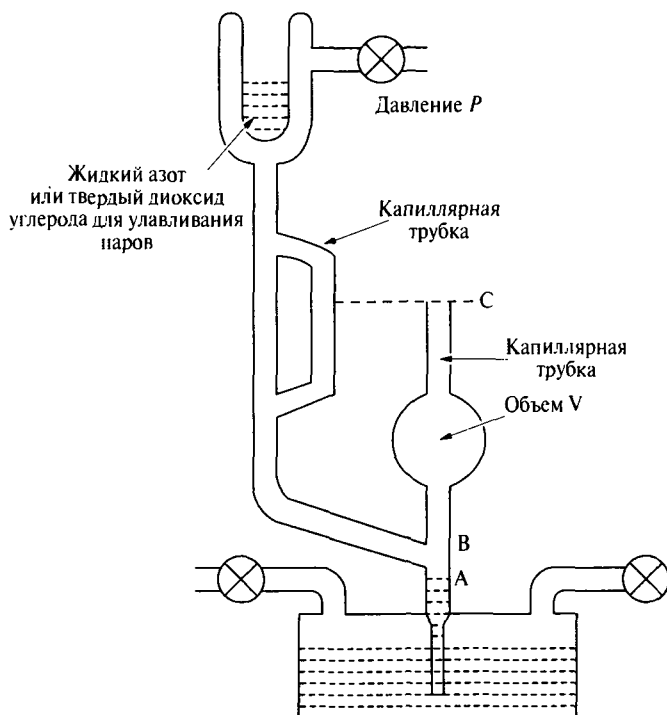


Рис. 22.1. Измеритель Маклауда

При условии, что hA много меньше объема V , это уравнение можно переписать в приближенном виде:

$$p = \frac{Ah^2 \rho g}{V}.$$

Измерители такого типа могут использоваться для измерений давления в диапазоне от 5×10^{-4} Па до атмосферного с точностью $\pm 5 \dots 10\%$.

Измерители давления по теплопроводности

Величина температуры нагрева проволоки или резистора при прохождении через них электрического тока зависит от того, насколько быстро окружающий газ отводит тепло от этого элемента, а это, в свою очередь, определяется давлением этого газа.

2. Измеритель Пирани

Измеритель такого типа состоит из платиновой или вольфрамовой проволоки, размещенной в стеклянной или металлической трубке. Электрическое сопротивление этой проволоки зависит от давления в трубке. Для уменьшения влияния изменений температуры окружающей среды используют дополнительную точно такую же трубку, но с запаянным концом, в которой давление всегда будет постоянным. Эти две трубки (рабочая и дополнительная) включаются в два соседних плеча моста Уитстона (Рис. 22.2). По величине разбаланса токов моста определяют значение давления в рабочей трубке измерителя. Измеритель Пирани используется для измерения давления в диапазоне $10^{-2} \dots 10^3$ Па с точностью порядка $\pm 10\%$.

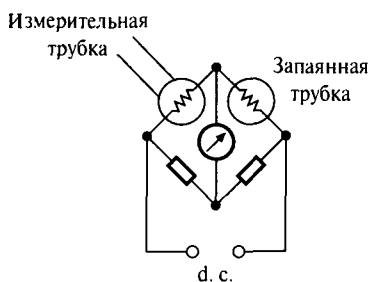


Рис. 22.2. Мостовая схема Уитстона с измерителем Пирани

3. Термисторный измеритель

Принцип действия такого прибора аналогичен принципу действия измерителя Пирани, только вместо металлической проволоки здесь используется термистор. Так как термисторы обладают довольно большим интервалом изменения сопротивления и к

тому же очень малы, то и чувствительность термисторных измерителей гораздо выше, чем у измерителей, использующих металлическую проволоку. Время реакции на изменение давления у таких измерителей значительно меньше, чем у измерителей Пирани. Термисторный измеритель используется для измерения давления в диапазоне $10^{-2} \dots 10^3$ Па с точностью порядка $\pm 10\%$.

4. Термопарный измеритель

Термопарный измеритель состоит из проволоки, нагреваемой электричеством. Температура проволоки измеряется при помощи термопары, прикрепленной к ней. По выходной разности потенциалов этой термопары определяют давление газа. Термопарный измеритель используется для измерения давления в диапазоне $10^{-1} \dots 10^3$ Па с точностью порядка $\pm 20\%$.

Ионизационные измерители

Если электроны начнут «бомбардировать» молекулы газа, то может возникнуть его ионизация, в результате этого между двумя электродами появится электрический ток. Степень ионизации зависит от числа молекул газа, а, следовательно, и от его давления. Ионизационные измерители можно разделить на две группы:

- измерители с «холодным» катодом (здесь электроны образуются от столкновения ионов с «холодным» катодом);
- измерители с «горячим» катодом (здесь электроны испускаются в результате нагрева катода).

5. Газоразрядная трубка

Газоразрядная трубка относится к типу измерителей с «холодным» катодом. Она состоит из стеклянной трубки с двумя впаянными электродами (Рис. 22.3). К этим двум электродам прикладывается высокое напряжение. В результате этого в трубке появляется тлеющее свечение, цвет которого зависит от присутствующих там газов. Свечение появляется при давлениях в интервале порядка $10^3 \dots 10^{-1}$ Па. Верхняя граница давлений обусловлена тем, что электроны, многократно сталкиваясь с молекулами газа, каждый раз теряют свою энергию, и наступает такой предел, когда их энергии уже не хватает для ионизации этих молекул. Нижняя граница объясняется тем, что молекул газа становится так ма-



Рис. 22.3. Газоразрядная трубка

ло, что основная часть электронов пролетает всю длину трубки без столкновений с ними. Газоразрядные трубки обычно используются только для грубого определения состояния вакуума.

6. Измеритель Пенинга

Измеритель Пенинга также относится к типу измерителей с «холодным» катодом. Он состоит из двух параллельных плоских катодов, отстоящих друг от друга примерно на 20 мм, которые помещены в стеклянный или металлический корпус (Рис. 22.4). Посередине между катодами находится проволочный анод. Измеритель расположен между полюсами постоянного магнита или электромагнита, который создает магнитное поле, направленное под прямым углом к плоскостям катодов. Электроны, испускаемые катодами, двигаются к аноду. Их путь направлен скорее по спирали, чем вдоль силовых линий. Вследствие этого путь, который проходят электроны, значительно увеличивается, и поэтому повышается вероятность столкновения между электронами и молекулами газа. Чем больше степень ионизации газа, тем больший ток появляется между электродами. Таким образом, по величине тока можно судить о давлении газа в измерителе. Зависимость между величинами тока и давления является довольно линейной. Измеритель Пенинга используется для измерения давления в диапазоне $10^{-5} \dots 1$ Па с точностью порядка $\pm 10 \dots 20\%$. Недостаток такого измерителя — наличие гистерезиса, здесь ток зависит от того, увеличивается ли давление или уменьшается.

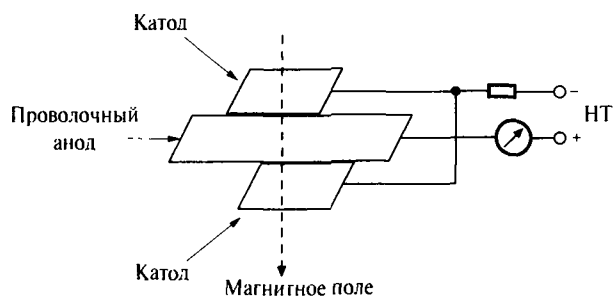


Рис. 22.4. Измеритель Пенинга

7. Измеритель с «горячим» катодом

В данных приборах электроны испускаются нагретой нитью. Вокруг нити находится специальная сетка для улавливания электронов, а вокруг сетки расположен цилиндрический электрод коллектора ионов (Рис. 22.5). Сетка имеет положительный потенциал относительно нити и поэтому улавливает электроны, возникающие в результате столкновений между испускаемыми нитью электронами и молекулами газа. Внешний электрод име-

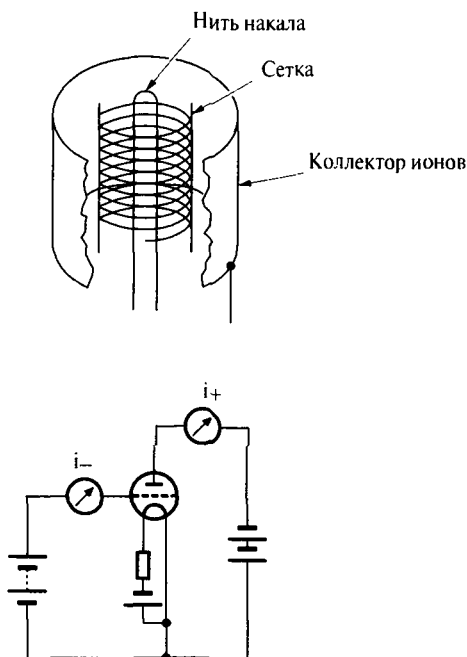


Рис. 22.5. Ионизационный измеритель с «горячим» катодом

ет отрицательный потенциал относительно нити и сетки и, следовательно, притягивает положительные ионы. Давление газа P пропорционально отношению тока ионов i_+ к току электронов i_- . Таким образом, справедливо следующее:

$$i_+ = k P i_- ,$$

где k — это постоянная величина, называемая коэффициентом измерителя. Этот коэффициент обычно вычисляется для азота. Для других газов он умножается на коэффициент относительной чувствительности C по вычислению вероятности возникновения ионов. Если ток электронов i_- поддерживать постоянным, то ионный ток i_+ будет прямо пропорционален давлению газа. Измеритель с подогреваемым катодом используется для измерения давления в диапазоне $10^{-6} \dots 10^2$ Па с точностью порядка $\pm 10 \dots 30\%$.

8. Измеритель Баярда—Алперта

В области очень низких давлений применение измерителя с «горячим» катодом в известной степени ограничено рентгеновским излучением, возникающим в результате столкновений электронов с сеткой. Коллектор ионов поглощает рентгеновское излучение и испускает фотоэлектроны, которые затем собираются сеткой и дают фоновую составляющую тока электронов сверх ионизационной составляющей, которая зависит от давления газов. Величина фоновой составляющей того же порядка, что и ионизационная при давлении 10^{-6} Па. Для уменьшения этого эффекта Ба-

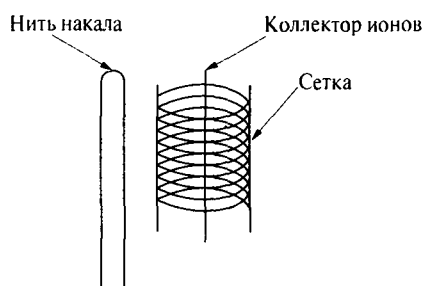


Рис. 22.6. Ионизационный измеритель Баярда—Алперта

ярд и Альперт усовершенствовали конструкцию (**Рис. 22.6**), в которой коллектор ионов — это тонкая проволока, и поэтому рентгеновские лучи перехватываются поверхностью очень малой площади. Измеритель Баярда—Алперта используется для измерения давления в диапазоне $10^{-8} \dots 1$ Па с точностью порядка $\pm 10 \dots 30$.

Часть четвертая

Микро- процессорные системы

23. МИКРОПРОЦЕССОРЫ В ПРИБОРАХ

Программируемые приборы

Термин «программируемый» применяется для измерительных систем, в состав которых входит микропроцессор для выполнения основных операций по обработке принимаемого сигнала. В простых приборах измерительная система может включать несколько датчиков, каждый из которых подсоединен к соответствующему преобразователю сигналов. Оператор снимает показания от каждого датчика, которые затем обрабатывает для получения значения измеряемой величины. Например, по результатам измерения температуры «сухим» и «влажным» термометром оператор вычисляет значение относительной влажности. Другой пример: оператор корректирует полученные данные с учетом нелинейности. Таким образом, процесс получения значения измеряемой величины при использовании простых приборов может включать в себя такие процедуры, как арифметические операции с серией измерений, вычисления с использованием калибровочных коэффициентов, уточнение результатов измерений с учетом специальных факторов, например учет нелинейности. В этих случаях оператор является как бы элементом системы обработки сигналов, необходимым для получения значения измеряемой величины. Микропроцессорные системы служат для исключения человека из процесса обработки сигналов, так как они могут снимать показания одновременно с нескольких датчиков или проводить опрос одного датчика заданное количество раз, обрабатывать принятые значения и выдавать полученное значение измеряемой величины прямо на выход системы. Кроме того, микропроцессорные системы могут выполнять ряд других задач, таких как преобразование данных в различные форматы, осреднение результатов, нахождение минимальных и максимальных значений, обработка данных от датчиков разных типов, проведение периодических калибровок, принятие решений по управлению системой, основанных на полученных данных, и т.д.

Для иллюстрации вышесказанного приведена схема микропроцессорных товарных весов, где в качестве чувствительного элемента используется динамометрический элемент (**Рис. 23.1**). Эти весы могут быть использованы на контроле в супермаркетах для определения цены корзины яблок или любых других товаров. Информация о количестве проданного товара может одновременно поступать на склад, и тогда при помощи такой обратной связи возможно проводить мониторинг количества товаров.

Микропроцессор, управляющий этими весами, может иметь внутреннюю систему калибровки. Когда приходит команда про-

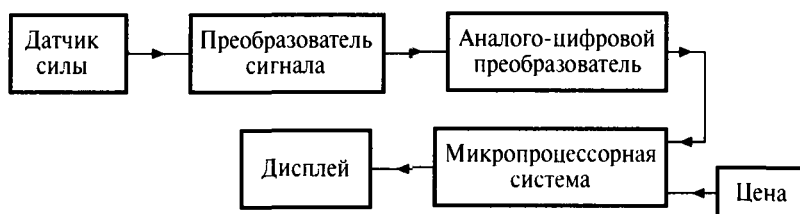


Рис. 23.1. Микропроцессорные весы товарные

известии калибровку, на динамометрический элемент автоматически помещается стандартный груз и определяется его вес. Полученное значение затем сравнивается со значением точного веса, хранящегося в памяти системы, и если между этими значениями существует некоторое рассогласование, оно учитывается для корректировки последующих взвешиваний.

Другой пример приведен на **Рис. 23.2**. Здесь показаны элементы микропроцессорной системы измерения температуры на основе термопары. Так как э.д.с. термопары не является линейной функцией температуры, то для получения значений измеренной температуры необходимо использовать специальные таблицы, переводящие э.д.с. термопары в градусы. В этих таблицах считается, что холодный спай термопары находится при температуре 0°C . Если это условие не выполняется, то необходимо производить корректировку полученных данных. Поэтому в данной системе микропроцессор отслеживает измеряемую температуру по изменению э.д.с. на горячем спае температуры, а для контроля температуры холодного спае термопары используется термосопротивление. После преобразования эти сигналы от двух элементов поступают в микропроцессор, который и производит вычисление значений измеряемой величины.

Еще один пример применения микропроцессорных систем — измерение относительной влажности воздуха. Здесь необходимо одновременно измерять температуру сухим и влажным



Рис. 23.2. Микропроцессорная система измерения температуры

термометром. Если обработка полученных данных ведется вручную, то после проведения измерений оператор ищет в таблицах два соответствующих значения, по которым и вычисляет потом значение относительной влажности. Очевидно, что прибор, способный сразу выдавать значения относительной влажности, должен быть микропроцессорным. На **Рис. 23.3** показан один из вариантов такого прибора. Датчики температуры могут быть пьезоэлектрическими, например кварцевыми, у которых частота зависит от температуры. Таким образом, микропроцессор в такой системе принимает два сигнала, по значениям которых, используя стандартные таблицы, вычисляет величину относительной влажности. На отображающее устройство могут выводиться, например, значения двух температур и относительной влажности.

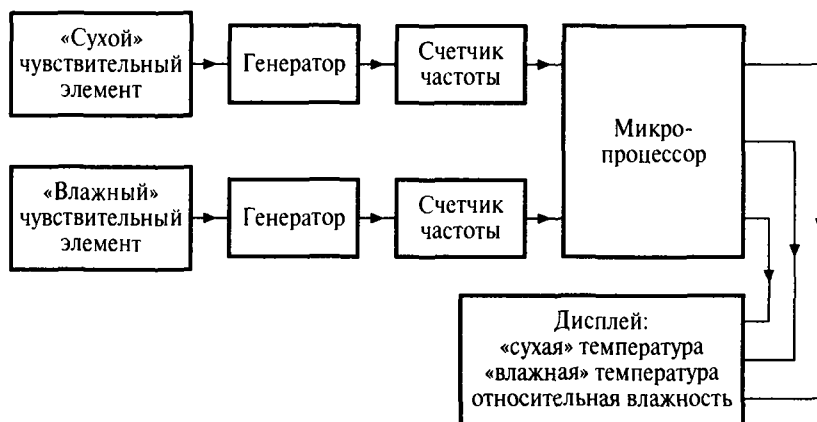


Рис. 23.3. Микропроцессорная система измерения относительной влажности

Основные элементы микропроцессорных систем

Основные элементы микропроцессорной системы (**Рис. 23.4**) — это **центральное процессорное устройство (ЦПУ)**, **запоминающее устройство (память)**, **входной и выходной интерфейсы**.

Микропроцессор — это и есть центральное процессорное устройство (ЦПУ), которое является ответственным за выполнение арифметических и логических операций с двоичными данными, а также управляет синхронизацией и порядком выполнения операций во всей измерительной системе. Существует два типа запоминающих устройств:

— **постоянное запоминающее устройство (ПЗУ)** используется для хранения постоянных данных, которые записаны в него в процессе заводского изготовления. ЦПУ может только считывать данные с ПЗУ и не может ввести (чаще применяется термин «записать») в него данные. ПЗУ используется для хранения операционной системы микропроцессора и стандартных программ;

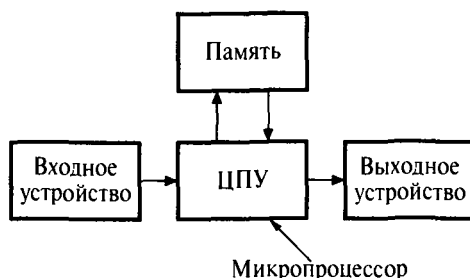


Рис. 23.4. Микропроцессорная система

— **запоминающее устройство с произвольной выборкой или оперативное запоминающее устройство (ОЗУ)** используется для временного хранения данных. ЦПУ может не только считывать информацию из ОЗУ, но и записывать туда новые данные. Если не используется резервная батарея для питания ОЗУ, то сохраненные в нем данные будут утеряны при выключении сетевого электропитания. ОЗУ используется для хранения пользовательских программ.

Входной и выходной интерфейсы используются для согласования микропроцессора с внешними устройствами. Для обозначения этих интерфейсов часто используется термин «входной и выходной порт». Входной порт получает сигналы от внешних устройств, которые должны быть обязательно преобразованы в двоичный код для ЦПУ. Выходной порт получает двоичные данные из ЦПУ для передачи во внешние устройства.

Основные элементы микропроцессорной системы объединяются при помощи так называемой шины (Рис. 23.5). **Шина** — это группа проводящих дорожек на плате или проводов, по которым посылаются цифровые сигналы.

В микропроцессоре есть три основные шины. **Шина данных** используется для передачи данных между микропроцессором и другими элементами системы. **Адресная шина** используется для передачи адреса области памяти, по которому данные можно отыскать или сохранить. **Шина управления** используется для

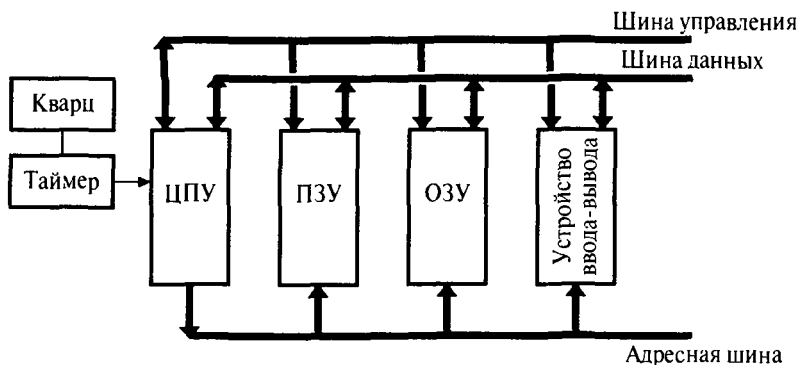


Рис. 23.5. Архитектура микропроцессора

передачи сигналов управления из микропроцессора другим элементам системы.

Передача данных по шинам называется *параллельной передачей*. При *последовательной передаче данных* каждый бит по очереди передается по одному-единственному проводу. А при параллельной передаче данных, например при передаче двоичного числа 0101 1011, представляющего значение некоторого входного сигнала, по шине передаются все восемь разрядов одновременно, и каждый разряд по своему отдельному проводу. Количеством входных линий, по которым данные могут поступать в микропроцессор, определяется разрядность шины данных. Микропроцессоры, в свою очередь, тоже подразделяются по разрядности своего информационного канала, например, есть восьмиразрядный процессор. Термин «слово» используется для обозначения набора разрядов, который представляет единицу информации. Длина слова может быть 4, 8, 16, 32 или 64 разряда. Длина слова определяет количество элементарных единиц информации — двоичных чисел, которое может быть передано этим словом. Например, при длине слова 4 разряда можно определить количество таких чисел, равное $2^4 = 16$; при длине слова 8 разрядов — количество чисел, равное $2^8 = 256$, а при длине слова длиной 16 разрядов — $2^{16} = 65536$ чисел. Предположим, что имеется датчик температуры с рабочим диапазоном температур $0...120^\circ \text{C}$, и необходимо производить измерения с точностью 0.5°C . Для этого необходимо разбить указанный интервал измерений на 240 частей. Очевидно, что для представления 240 различных значений входного сигнала микропроцессор должен иметь возможность выдавать столько же разных двоичных чисел. Таким образом, в этом случае микропроцессор должен быть как минимум восьмиразрядным ($2^8 = 256 > 240$).

Микропроцессор

Основные компоненты микропроцессора или ЦПУ (**Рис. 23.6**) — это арифметико-логическое устройство, устройство управления и регистры. Регистры — это область памяти, в которой может быть сохранена информация, используемая выполняемой программой.

1. **Арифметико-логическое устройство (АЛУ)** взаимодействует с остальными элементами системы, обмениваясь данными с внешними устройствами через порт ввода/вывода. Также АЛУ выполняет операции в соответствии с набором команд, называемых программой, которая хранится в памяти.
2. Все процессы в системе синхронизируются **устройством управления**, которое отвечает за распределение во времени всех команд и потоков данных. Количество регистров и их вид меняются в зависимости от типа микропроцессора.

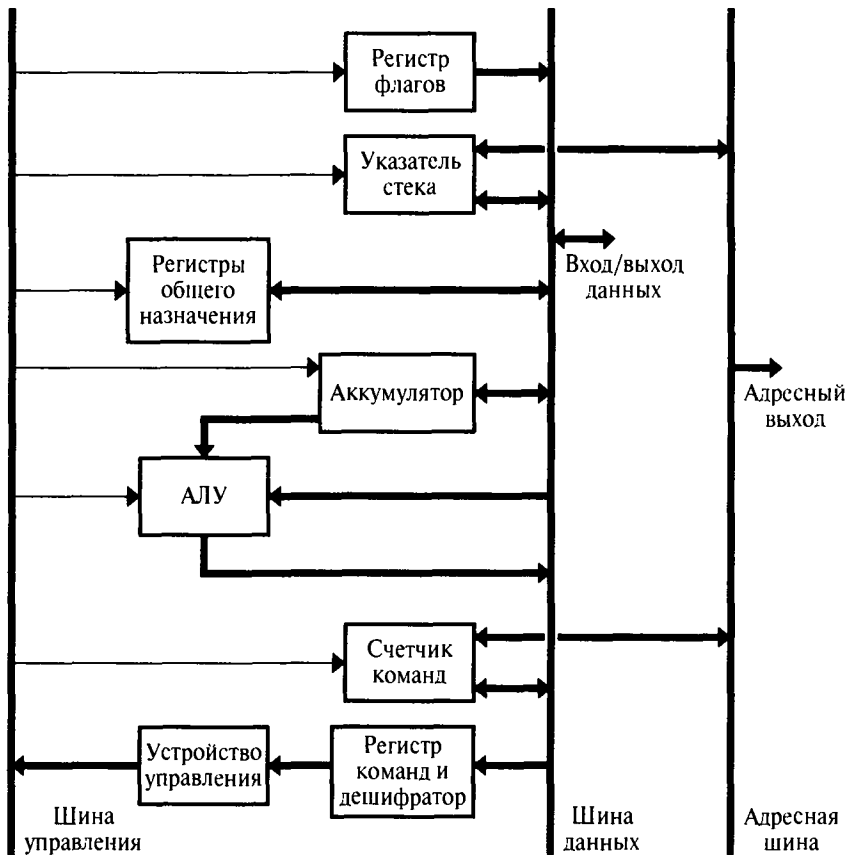


Рис. 23.6. Основные элементы микропроцессора

3. Основными регистрами являются: **аккумулятор**, где временно хранятся вводимые в АЛУ данные; **регистр флагов**, в котором хранится информация, отражающая результат выполнения последней команды в АЛУ; **счетчик команд**, по которому микропроцессор отслеживает номер исполняемой команды в программе; **указатель стека**, в который, например, можно поместить значение счетчика команд, чтобы запомнить текущее место в программе, на которое нужно будет вернуться после выполнения определенной подпрограммы; **регистр команд и дешифратор**, где команда преобразуется в требуемый для последующего выполнения вид.

Микропроцессору всегда необходимо иметь интерфейсы между входами и выходами для подсоединения к периферийным устройствам. Интерфейсы необходимы потому, что сигналы, приходящие от периферийных устройств, часто не удовлетворяют требованиям, предъявляемым микропроцессором ко входным сигналам, или скорость их передачи такая, которую микропроцессор не может поддерживать. В свою очередь, требования периферийных устройств ко входным сигналам могут не соответствовать выходным сигналам микропроцессора, например,

по уровню сигналов или скорости их передачи. Интерфейсы описаны в главе 24.

Микроконтроллеры

Микроконтроллеры — это интегрированные схемы на одном кристалле, включающие в себя микропроцессор с памятью и входные/выходные интерфейсы. На **Рис. 23.7** показана общая блок-схема микроконтроллера. Обычно микроконтроллеры имеют несколько входных и выходных портов, некоторые из которых могут быть запрограммированы либо для приема, либо для передачи сигналов. Один из входных портов может иметь свой собственный аналого-цифровой преобразователь, и поэтому к нему возможно прямое подключение аналоговых сигналов. Часто один из каналов порта может быть запрограммирован для последовательного приема или передачи сигналов. Также в состав микроконтроллера обычно входят такие устройства, как таймеры.

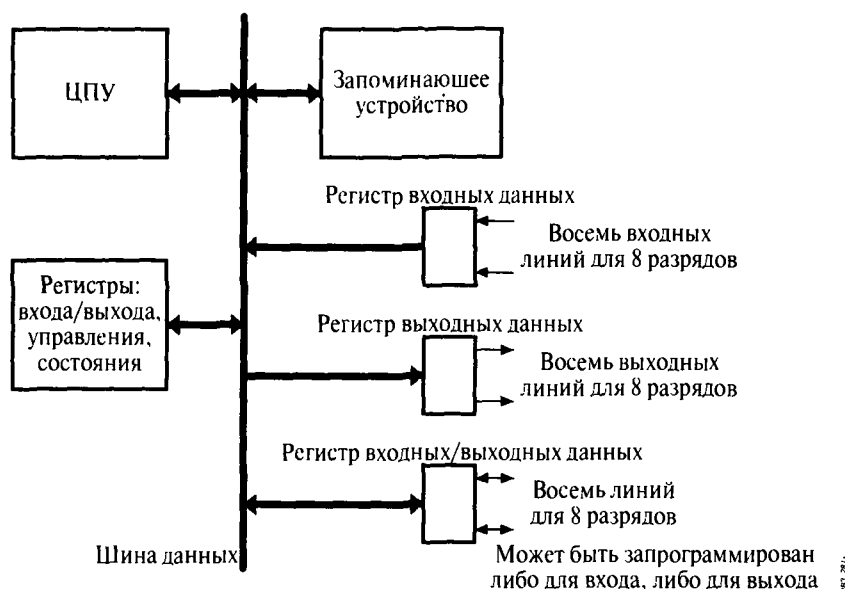


Рис. 23.7. Основные элементы микроконтроллера

Дополнительная литература: Anderson J.S. (1994), *Microprocessor technology*, Butterworth-Heinemann; Bolton W. (2000), *Microprocessor Systems*, Longman; Vears R. (1996), *Microelectronic Systems*, Butterworth-Heinemann.

Основные элементы приборов на основе микропроцессоров

На **Рис. 23.8** показаны основные элементы цифрового термометра. Чувствительным элементом термометра является термостранзистор, который заключен в отдельный корпус вместе с пре-

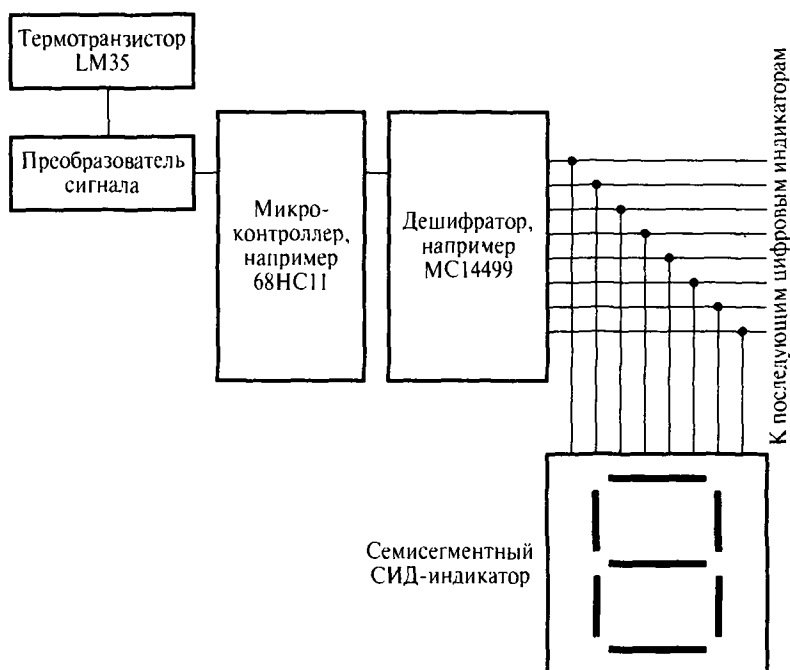


Рис. 23.8. Цифровой термометр

образователем сигнала, выдающим на выходе сигнал, пропорциональный измеряемой температуре. (Например, термотранзистор LM35 выдает сигнал $10 \text{ мВ}/^{\circ}\text{C}$ в диапазоне $-40\dots110^{\circ}\text{C}$.) Этот сигнал подается на входной аналоговый порт микроконтроллера. Выходной сигнал микроконтроллера по линии последовательной передачи поступает в декодирующее устройство, где преобразуется в вид, необходимый для отображения на цифровом дисплее.

На **Рис. 23.9** приведена принципиальная схема типичного **микропроцессорного прибора**. Управляющая программа вводится в систему через клавиатуру или считывается с гибкого диска и записывается в ОЗУ. В программное обеспечение системы может входить несколько различных программ в зависимости от задач, которые должна решать эта система. В ПЗУ системы хранятся установочные данные и подпрограммы, записанные в запоминающее устройство при изготовлении прибора, которые не могут быть изменены.

Выходной сигнал датчика и преобразователя чаще всего бывает аналоговым. При запуске программы микропроцессор дает команду аналого-цифровому преобразователю принять значение аналогового сигнала с датчика, преобразовать его в цифровой код, т.е. в 8-разрядное параллельное слово, и поместить его на шину данных. ЦПУ принимает эти данные и обрабатывает их в соответствии с программой. Результат выполнения этих дейст-

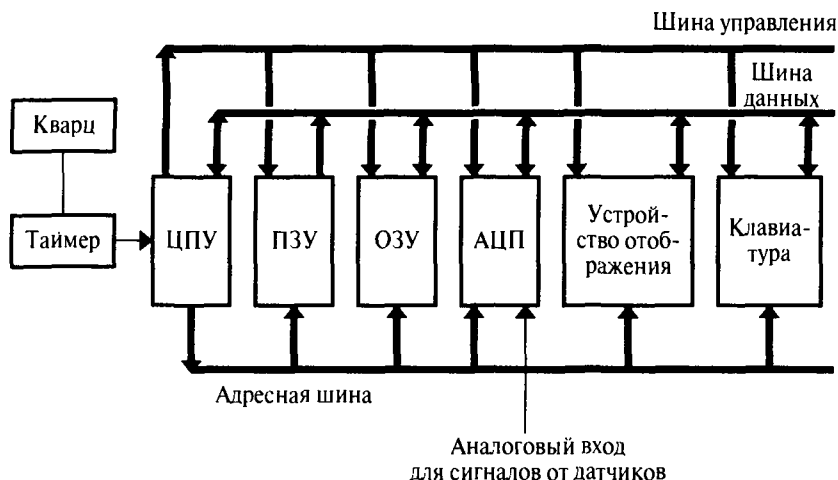


Рис. 23.9. Микропроцессорный прибор

вий может быть или отображен на дисплее, или записан в ОЗУ для дальнейших вычислений, или сравнен со значением, хранящимся в ОЗУ, и по результату этого сравнения может быть запущен какой-то новый процесс. Вся эта последовательность действий повторяется при очередной команде микропроцессора на получение следующего значения аналогового сигнала.

Дополнительная литература: Bolton W. (2000), *Microprocessor Systems*, Longman; Tooley M. (1990, 1995), *PC-based Instrumentation and Control*, Butterworth-Heinemann; Fraser C.J., Milne J.S. (1990), *Microcomputer Application in Measurement Systems*, Macmillan.

Системы сбора данных

Часто бывают ситуации, когда необходимо одновременно определять значения нескольких переменных. Например, это могут быть измерения скорости потока, температуры, давления и т.д. в разных точках химического производства. Комплексная система может принимать данные от сотни датчиков одновременно. Вместо того чтобы для каждого измерения использовать отдельную систему, применяют устройство сбора данных (УСД). На Рис. 23.10 показана структура устройства сбора данных.

Выходные сигналы от каждого датчика поступают в формирователь сигналов, где они могут быть преобразованы в напряжение, усилены, линеаризованы и т.д. для того, чтобы соответствовать стандартному диапазону принимаемых сигналов, обычно 0...5 В. Сформированные соответствующим образом сигналы затем поступают на мультиплексор. Мультиплексор управляется микропроцессором. Таким образом, микропроцессор имеет возможность выбирать для работы тот или иной входной сигнал. Далее отобранный сигнал поступает через устрой-

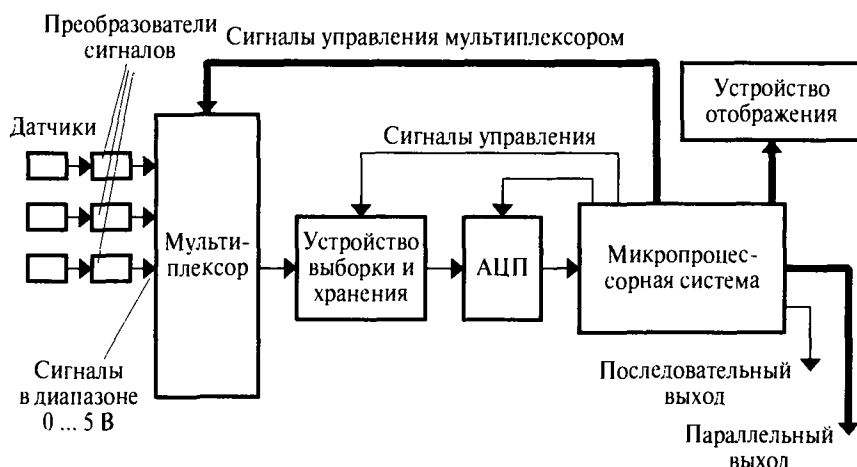


Рис. 23.10. Основные элементы системы сбора данных

ство выборки и хранения в аналого-цифровой преобразователь, где превращается в параллельное слово для ввода в микропроцессор, где и обрабатывается. Результат обработки либо отображается на дисплее микропроцессора, либо передается на удаленный дисплей, либо используется системой управления, либо сохраняется в памяти.

Плата УСД

При использовании РС ЭВМ в один из слотов расширения на системной плате компьютера может быть вставлена плата УСД, в состав которой, как правило, входит мультиплексор и аналого-цифровой преобразователь. Если потребности системы измерения превышают возможности разъема на системной плате, то УСД может быть выполнено в виде отдельного блока. В состав УСД могут также входить преобразователи сигналов, которые могут быть использованы для работы со стандартными датчиками, например с термопарами. Типовая плата УСД обычно включает в себя 12-разрядный аналого-цифровой преобразователь с 16 входными каналами с временем преобразования, равным 25 мкс. На Рис. 23.11 приведены основные элементы типовой платы УСД.

Основные характеристики плат УСД для аналоговых входов:

1. **Частота преобразования.** Она определяет максимальное количество аналого-цифровых преобразований входного сигнала в секунду.
2. **Число входных каналов.** Для поочередного съема данных с каждого канала используется мультиплексор.
3. **Разрядность.** Она часто определяется числом разрядов, которое используется аналого-цифровым преобразователем для представления аналогового сигнала, например 12 разрядов.

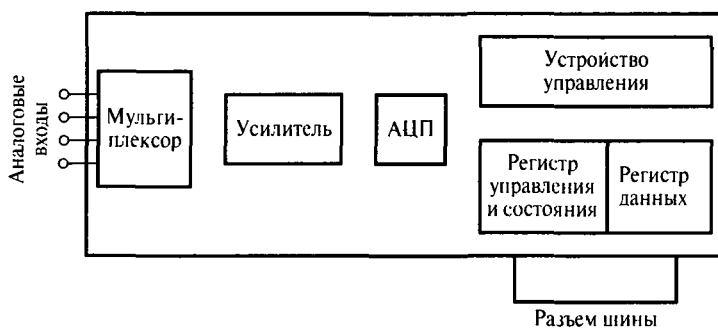


Рис. 23.11. Типовая плата УСД

4. **Диапазон входного сигнала.** Он определяет минимальное и максимальное напряжение входного аналогового сигнала, которые могут быть обработаны аналого-цифровым преобразователем (АЦП), например 0...10 вольт.
5. **Коэффициент усиления.** Обычно существует возможность задавать коэффициент усиления усилителя, расположенного на плате УСД. Его значение совместно с величиной входного диапазона и разрядностью АЦП определяет минимально различимое изменение аналогового сигнала на входе. Таким образом, если коэффициент усиления равен 20, входной диапазон — 0...10 вольт, а разрядность УСД — 12, то наименьшее различимое значение определяется как $10/(20 \times 2^{12}) \approx 120$ мкВ.

Основные характеристики плат УСД для цифровых входов:

1. **Число каналов.**
2. **Уровни логических сигналов.** Эта величина определяет максимальное и минимальное напряжение (т.е. уровни логического «0» и «1»).
3. **Сигналы подтверждения связи.** При передаче цифровых сигналов между компьютером и внешними устройствами должны использоваться специальные схемы, обеспечивающие подтверждение установления связи. Это необходимое условие для осуществления обмена данными и синхронизации этого обмена (см. главу 24).

Программирование микропроцессора

Микропроцессор должен быть запрограммирован на прием данных. Можно написать программу на **языке высокого уровня Бэйсик** или на каком-либо другом языке, можно использовать программное обеспечение для конкретного УСД, специально написанное так, чтобы оператор мог без написания своей собственной программы выбрать на экране в диалоговом режиме нужную последовательность действий. Алгоритм написания программы можно задать следующим образом:

1. Задать адрес платы УСД.
2. Выбрать входной канал.

3. Послать команду для начала преобразований.
4. Проверить окончание преобразований.
5. Считать выходные данные с аналого-цифрового преобразователя.
6. Сохранить данные в памяти.
7. Могут быть разработаны различные циклические подпрограммы для опроса только одного канала или сканирования по каналам, для чего можно организовать повторение шагов со 2 по 6 для остальных каналов.
8. Результат может быть распечатан, отображен на дисплее или передан для дальнейшей обработки.

В продаже существует широкий выбор **пакетов программ**, которые могут быть использованы для управления компьютером в режиме сбора данных, что позволяет избегать написания собственных программ. В таких программах принятый сигнал, как правило, сразу отображается на дисплее. Часто эти программы имеют редактор приложений, позволяющий оператору определять источники данных и алгоритмы их обработки, которые необходимо применить для данного конкретного приложения. Для этого оператор заполняет соответствующие пункты меню на экране дисплея, выбирает требуемые параметры, используя элементы экранного управления, соединяет друг с другом необходимые блоки. Некоторые из таких программ дают возможность проводить качественный сбор, обработку и отображение информации. Такие программы можно рассматривать как инструмент для сбора и обработки информации в формате ASCII. Полученные данные могут в дальнейшем использоваться другими программами. Примерами таких пакетов программ могут служить: DT VEE, Lab Tech Notebook_{pro}, Lab View, Lab Windows, Signal Centre Professional, Test point and Virtual Designer.

Дополнительная литература: Paton B.E. (1999), *Sensors, Transducers and Lab View*, Prentice Hall.

Устройство регистрации данных

Термин «регистратор данных» используется для обозначения дополнительного устройства, которое может быть подсоединено к измерительной системе. Оно программируется на съем и хранение измеряемых значений от нескольких датчиков. Позднее это устройство может быть подсоединено к ЭВМ для считывания с него собранных данных для дальнейшей обработки и отображения. Регистратор данных может быть запрограммирован независимо от компьютера или управляться через линию связи с компьютером. Регистратор данных — это полезное устройство для удаленных, труднодоступных для мониторинга объектов.

24. ИНТЕРФЕЙСЫ

Стандартный интерфейс

Часто бывает необходимо включить в состав микропроцессорной системы какие-то дополнительные подсистемы. Прежде чем выполнять такие подсоединения, необходимо предварительно убедиться, что у этих систем совместимы такие параметры, как разъемы, управляющие сигналы и логические уровни. Процесс согласования при подсоединении значительно упрощается при использовании *стандартного интерфейса*. Этот интерфейс определяет тип используемых разъемов, а также доступные сигналы и их расположение на разъемах. Такая стандартизация позволяет легко подсоединять новые элементы к системе.

В случае цифровых сигналов их передача может осуществляться либо параллельным, либо последовательным способом. *Параллельная передача* предполагает использование кабельной системы, в которой все разряды слова данных передаются одновременно по параллельным линиям. *Последовательная передача* предполагает, что каждый разряд данных передается поочередно по одной-единственной линии. Передача сигналов при параллельном соединении осуществляется быстрее, чем при последовательном, но она ограничена максимальной скоростью передачи, равной 1 МБайт/с при максимальном расстоянии передачи, равном 15 метрам; здесь подразумевается, что чем выше скорость передачи, тем меньше должно быть расстояние передачи, и что параллельная передача сигналов может осуществляться только при низком уровне помех. Последовательная передача позволяет передавать данные на более значительные расстояния.

Интерфейсы для приборов общего назначения

Для параллельной передачи данных в измерительных системах наиболее часто используется стандартный интерфейс IEEE-488, который также называется интерфейсом общего назначения GPIB. Этот интерфейс первоначально был разработан фирмой Hewlett Packard и назывался приборным интерфейсом Hewlett Packard (HPIB). Магистраль интерфейса состоит из 24 сигнальных линий, восемь из которых — линии заземления, а остальные линии разбиты на три группы (**Рис. 24.1**). Первая группа, состоящая из восьми двунаправленных сигнальных линий, называется шиной данных и используется для передачи данных и команд между различными приборами, подсоединенными к интерфейсу. Другая группа из пяти сигнальных линий — это шина общего управления интерфейсом, по ней передаются сигналы управления и состояния. Оставшаяся группа из трех линий используется для управления передачей данных по шине и называется шиной квитирования.

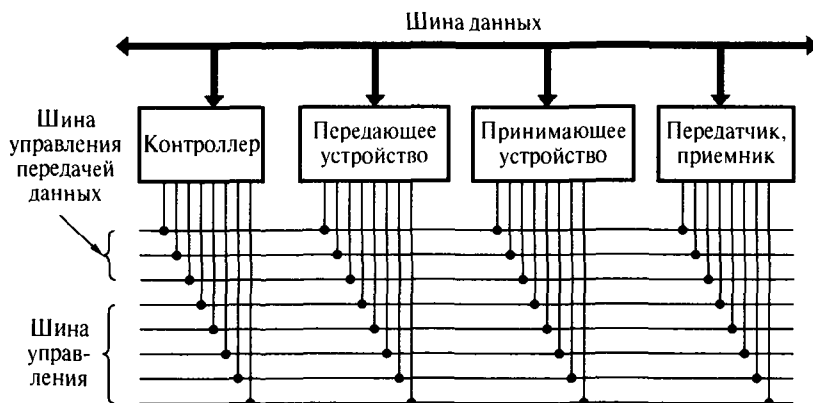


Рис. 24.1. Структура интерфейса IEEE-488. Приемник сообщений — это устройство, принимающее данные из шины, а источник сообщений — это устройство, передающее по шине данные всем подключенным к ней устройствам

Приборы, подсоединяемые к интерфейсу, могут работать либо как приемники, либо как источники сообщений. Прибор в режиме приемника сообщений получает данные с магистрали интерфейса, а в режиме источника сообщений — отправляет туда данные. В каждый момент времени только одно устройство может быть источником сообщений, тогда как приемниками сообщений может быть одновременно несколько устройств. Одно из устройств на магистрали работает как контроллер интерфейса. При подаче соответствующей команды по шине данных можно перевести устройство из режима приемника сообщений в режим источника сообщений. Каждый прибор, подсоединенный к магистрали интерфейса, имеет свой собственный адрес; всего можно присвоить адрес 31 устройству. Адреса приборов посылаются по шине данных в виде параллельного слова, состоящего из семи разрядов: младшие 5 разрядов этого слова передают сам адрес, а остальные два — управляющую информацию. Если оба этих управляющих разряда равны 0, то команды рассылаются по всем адресам; если шестой разряд равен 1, а седьмой разряд равен 0, то адресуемый прибор должен переключиться в режим приемника сообщений; а если шестой разряд равен 0, а седьмой — 1, то адресуемый прибор переключается в режим источника сообщений.

На шине общего управления каждая сигнальная линия выполняет свою собственную задачу в управлении информационными потоками по магистрали интерфейса между его системами или подсистемами. Далее приведено описание пяти управляющих линий:

1. IFC («Сброс интерфейса») используется контроллером для переключения всех устройств, входящих в состав интерфейса, в исходное состояние.
2. ATN («Внимание») используется контроллером в момент, когда на шину данных выставляется некоторое сообщение. В зависи-

мости от уровня этого сигнала происходит идентификация этого сообщения. Если уровень на этой линии НИЗКИЙ, то на шине данных находится общая команда, и все участники должны ее принимать; если уровень ВЫСОКИЙ, то на шине данные.

3. SRQ («Требование на обслуживание») используется устройствами, подсоединенными к магистрали. По этой линии устройства передают контроллеру заявку на их обслуживание.
4. REN («Дистанционное управление») используется контроллером для переключения устройств на дистанционное управление.
5. EOI («Конец или подтверждение») может использоваться и контроллером, и устройствами. Данная линия используется либо для посылки признака окончания передачи прибором — источником сообщений, либо совместно с сигналом на линии ATN устанавливает порядок работы устройств, приславших заявку на обслуживание.

Если устройство работает в режиме источника сообщений, то оно может посылать данные по магистрали интерфейса всем приборам, установленным в режим приемников сообщений. Для этого прибор устанавливает на линии SRQ НИЗКИЙ уровень сигнала, таким образом передавая контроллеру требование на обслуживание. В ответ на это контроллер посылает сигнал по линии ATN, после чего прибор-источник может посылать сообщение на шину данных.

Сигнальные линии шины квитирования используются для управления побайтной передачей данных. Сигналы на этих трех линиях обеспечивают порядок, при котором в момент передачи данных источником сообщения устройства-приемники будут готовы их принять. В эту шину входят следующие линии:

1. DAV («Данные готовы») используется и контроллером, и прибором-источником. Когда на этой линии установлен НИЗКИЙ уровень, информация на шине данных выставлена и подготовлена для приема.
2. NRFD («К приему данных не готов») используется приемным устройством. Если на этой линии установлен ВЫСОКИЙ уровень, то приемное устройство готово принять данные.
3. NDAC («Данные не приняты») используется приемным устройством. Если на этой линии установлен ВЫСОКИЙ уровень, то прием данных завершился успешно.

В начальный момент времени на линии DAV устанавливается ВЫСОКИЙ уровень сигнала, показывающий, что на шине данных нет установленных значений, на линиях NRFD и NDAC установлен НИЗКИЙ уровень. После этого на шину данных может быть выставлено слово данных. В ответ на это сигнал на линии NRFD переходит в ВЫСОКИЙ уровень, что указывает на то, что все приемные устройства готовы к приему данных. На линии DAV устанавливается НИЗКИЙ уровень сигнала, показывающий, что на шине данных выставлены данные. Когда приемное

устройство примет слово данных, оно устанавливает сигнал ВЫСОКОГО уровня на линии NDAC, подтверждающий успешное завершение приема, и сигнал НИЗКОГО уровня на линии NRFD, указывающий на то, что устройство не готово к приему данных. После того, как все приборы-приемники выставили ВЫСОКИЕ уровни сигналов на линии NDAC, передающее устройство отменяет действие сигнала «Данные готовы», переводя сигнал DAV в ВЫСОКИЙ уровень. После чего сигнал NDAC переходит на НИЗКИЙ уровень. Далее этот весь процесс может быть повторен для очередного слова, помещенного на шину данных. **Рис. 24.2** иллюстрирует последовательность этих действий.

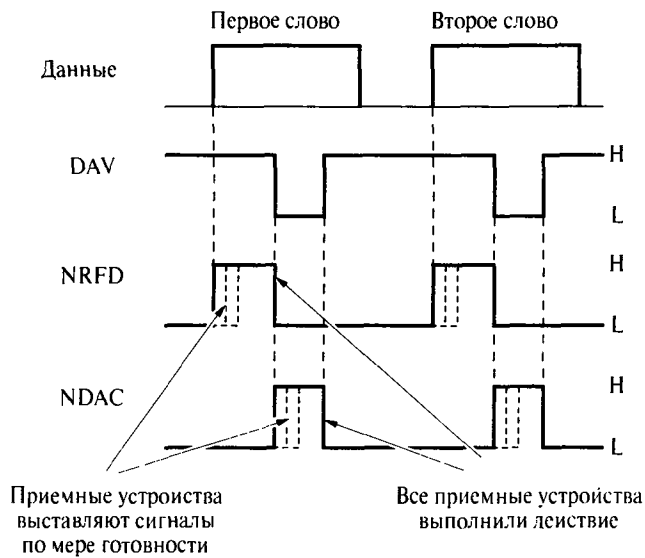


Рис. 24.2. Последовательность действий при приеме/передаче слова данных

Команды контроллера могут передаваться по одной сигнальной линии, например команда ATN занимает только одну сигнальную линию. Такие команды называются **одноканальными сообщениями**. Контроллер также может посылать многоканальные команды, используя несколько сигнальных линий, по шине данных при высоком уровне сигнала на линии ATN. Такие команды называются **многоканальными сообщениями**. Их можно подразделить на пять групп: команды выбора интерфейсных функций, адресованные приемным устройствам (ACQ); универсальные команды выбора интерфейсных функций, адресованные всем устройствам (USQ); команды, работающие с адресами принимающих устройств (LAG — для установки конкретного устройства в режим приема сообщений, UNL — для присвоения всем устройствам статуса, запрещающего прием сообщений); команды, работающие с адресами передающих устройств (TAG — для установки конкретного устройства в режим передачи сооб-

щений, UNL — для присвоения всем устройствам статуса, запрещающего передачу сообщений); вторичные команды (SCQ), которые используются для определения подадреса устройства или подпрограммы. Например, команда TAG передается следующим образом: седьмой разряд на шине данных устанавливается в «1», шестой — в «0», сигнал ATN — в «1». Значения других разрядов шины данных никакого влияния не имеют.

Для того, чтобы использовать интерфейс IEEE-488, необходимо установить на компьютере соответствующий драйвер для связи интерфейса с прикладной программой. Прикладная программа в этом случае получит доступ к функциям ввода/вывода данных, предоставляемым интерфейсом, используя такие команды, как ENTER, OUTPUT и т.д.

Интерфейс IEEE-488 обычно использует стандартный 24-штырьковый разъем для подсоединения приборов. Назначение выводов разъема приведено в Табл. 24.1.

Табл. 24.1. Разъем интерфейса IEEE-488

Вывод	Группа сигналов		Функция
1	Данные	D101	Линия данных 1
2	Данные	D102	Линия данных 2
3	Данные	D103	Линия данных 3
4	Данные	D104	Линия данных 4
5	Общее управление	EOI	«Конец или подтверждение»: либо посылается передающим устройством для обозначения конца сообщения, либо устанавливает порядок работы устройств, приславших заявку на обслуживание
6	Управление передачей данных	DAV	«Данные готовы»: когда на этой линии установлен НИЗКИЙ уровень, информация на шине данных подготовлена для приема
7	Управление передачей данных	NRFD	«К приему данных не готов»: используется приемным устройством. Если на этой линии установлен ВЫСОКИЙ уровень, то приемное устройство готово принять данные
8	Управление передачей данных	NDAC	«Данные не приняты»: используется приемным устройством. Если на этой линии установлен ВЫСОКИЙ уровень, то прием данных завершился успешно
9	Общее управление	IFC	«Сброс интерфейса»: используется контроллером для переключения всех устройств, входящих в состав интерфейса, в исходное состояние
10	Общее управление	SRQ	«Требование на обслуживание»: используется устройствами для передачи контроллеру заявки на обслуживание
11	Общее управление	ATN	«Внимание»: используется контроллером в момент, когда на шину данных поступает команда
12		SHIELD	Экран
13	Данные	D105	Линия данных 5
14	Данные	D106	Линия данных 6
15	Данные	D107	Линия данных 7

Табл. 24.1 (окончание)

Вывод	Группа сигналов		Функция
16	Данные	D108	Линия данных 8
17	Общее управление	REN	«Дистанционное управление»: используется контроллером для переключения устройств на дистанционное управление
18		GND	Земля/Общий
19		GND	Земля/Общий
20		GND	Земля/Общий
21		GND	Земля/Общий
22		GND	Земля/Общий
23		GND	Земля/Общий
24		GND	Сигнальная земля

Параллельный интерфейс Centronics

Параллельный интерфейс Centronics широко используется для подсоединения к параллельному порту принтера. В Табл. 24.2 приведено назначение выводов интерфейса Centronics. Уровни сигналов в интерфейсе Centronics соответствуют уровням сигналов ТТЛ (транзистор—транзисторная логика)

Табл. 24.2. Назначение выводов интерфейса Centronics

Сигнальный вывод	Обратный вывод	Сигнал	Функция
1	19	STROBE	Синхроимпульс считывания данных
2	20	DATA 1	1 разряд данных (младший разряд)
3	21	DATA 2	2 разряд данных
4	22	DATA 3	3 разряд данных
5	23	DATA 4	4 разряд данных
6	24	DATA 5	5 разряд данных
7	25	DATA 6	6 разряд данных
8	26	DATA 7	7 разряд данных
9	27	DATA 8	8 разряд данных (старший разряд)
10	28	ACK	Подтверждение приема данных и готовности принтера к приему новых данных
11	29	BUSY	Принтер занят. ВЫСОКИЙ уровень сигнала указывает на то, что принтер не готов к работе
12		PO	Нет бумаги. ВЫСОКИЙ уровень сигнала указывает на отсутствие в принтере бумаги
13		SLCT	Статус принтера. ВЫСОКИЙ уровень — принтер готов к приему данных, НИЗКИЙ — не готов
14		AUTO FEED	Сигнал запроса автоматического перевода строк. НИЗКИЙ уровень сигнала указывает, что режим автоматического перевода строк включен
16		SG	Сигнальная земля
17		FG	Земля корпуса

Табл. 24.2 (окончание)

Сигнальный вывод	Обратный вывод	Сигнал	Функция
18		+5 V	
31	30	PRIME	Инициализация принтера. НИЗКИЙ уровень — сброс принтера
32		ERROR	Статус ошибки. НИЗКИЙ уровень — обнаружена неисправность принтера
33		SG	Сигнальная земля

На **Рис. 24.3** показано, как принтер может быть подсоединен к микроконтроллеру Motorola 68HC11 через интерфейс Centronics. В данном примере порт C настраивается на вывод данных из микроконтроллера в принтер; микроконтроллер посылает синхроимпульсы со своего вывода STRB на принтер каждый раз при передаче данных. Управление передачей данных (квитирование) включает в себя два сигнала принтера: ACK и BUSY. Когда принтер получает синхроимпульс от микроконтроллера, он устанавливает на линии BUSY ВЫСОКИЙ уровень сигнала. После завершения приема данных принтер отправляет микроконтроллеру сигнал подтверждения ACK, указывающий на то, что он готов к получению очередных данных, и устанавливает НИЗКИЙ уровень сигнала на линии BUSY. Сигнал принтера о подтверждении приема данных ACK подается на вывод STRA разъема микроконтроллера; сигнал BUSY на рисунке не показан. Сигнал о статусе принтера SLCT подается на вывод PE7 разъема микроконтроллера; НИЗКИЙ уровень сигнала на этом выводе говорит о том, что принтер отсоединен от контроллера, а ВЫСОКИЙ — принтер готов к обмену. Сигнал неисправности ERROR поступает на вывод PE6 разъема микроконтроллера; если обнаруживается неисправность, уровень сигнала при этом становится НИЗКИМ.

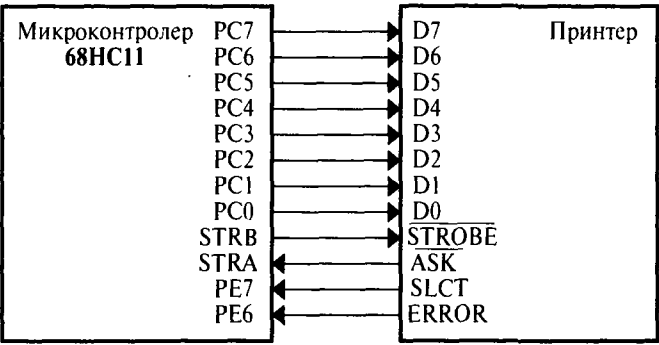


Рис. 24.3. Подсоединение принтера к микроконтроллеру через интерфейс Centronics

Последовательная передача данных

Существуют три формы связи для последовательной передачи цифровых данных:

1. **Симплексная связь.** Здесь участвует один передатчик А и один приемник В. Устройство В не может передавать данные обратно А. Связь осуществляется через отдельную пару проводов.
2. **Полудуплексная связь.** Здесь возможна двунаправленная передача данных от А к В и от В к А, но не одновременно. Связь осуществляется по кабелю, состоящему из двух или четырех проводов.
3. **Дуплексная связь.** Здесь возможна одновременная двунаправленная передача данных от А к В и от В к А. Связь осуществляется по кабелю, состоящему из двух или четырех проводов.

Для каждой из описанных выше форм связи необходимо, чтобы приемное устройство было готово принять и идентифицировать каждый набор данных, переданный передатчиком. Существуют два способа решения этой задачи. При **асинхронной передаче** каждому пакету данных предшествует старт-бит, а по окончании передачи этого пакета данных следует стоп-бит. Таким образом, приемное устройство всегда знает точно, где данные начинаются и где заканчиваются. Из-за необходимости постоянной проверки старт- и стоп-битов скорость передачи при данном виде связи ограничена и, как правило, не бывает больше 1200 бит/с. Этот вид связи используется в зоне неуверенного приема. При **синхронной передаче** не требуется никаких старт- и стоп-битов, так как передатчик и приемник синхронизированы. Начало приема/передачи данных предварительно синхронизируется синхросигналом, а затем каждое слово пакета данных распознается как блок из семи или восьми бит. При синхронной передаче периодически происходит рассинхронизация. Этот способ передачи данных может быть использован со скоростью более 1200 бит/с и наиболее часто применяется для передачи таких потоков данных, как программные файлы.

RS-232 — это широко распространенный стандартный последовательный интерфейс. Этот интерфейс может быть использован для передачи данных со скоростью до 20 000 бит/с на расстояние до 15 метров; на более длинные дистанции скорость передачи уменьшается. **Стандарт RS-449** — это более поздний стандарт, он обладает улучшенными характеристиками по скорости и расстоянию передачи; здесь уже достижима скорость до 10 000 бит/с на расстояние до 1 км. У интерфейса RS-232 уровень логической единицы составляет -12 В, а уровень логического нуля $+12$ В. Так как микропроцессоры имеют транзистор-транзисторную логику (ТТЛ), где уровень логического нуля составляет 0 В, а логической единицы — $+5$ В, то, очевидно, уров-

ни сигналов необходимо преобразовывать. Это достигается использованием интегральных микросхем, таких как: MC1488 для преобразования ТТЛ уровней в уровни для RS-232 и MC1489 для преобразования уровней RS-232 в ТТЛ уровни.

В Табл. 24.3 приведено назначение выводов интерфейса RS-232; сигналы могут быть разделены на три группы:

Табл. 24.3. Назначение выводов RS-232

Вывод	Направление		Сигнал/функция
1	FG		Земля корпуса
2	TXD	к АОД	Передаваемые данные
3	RXD	к АПД	Принимаемые данные
4	RTS	к АОД	Запрос на посылку сообщения
5	CTS	к АПД	Очистка линии для посылки сообщения
6	DSR	к АПД	Готовность оборудования к передаче данных
7	SG		Сигнальная земля/общий обратный провод
8	DCD	к АПД	Детектор приемной линии
12	SDCD	к АПД	Детектор вторичной приемной сигнальной линии
13	SCTS	к АПД	Очистка вторичной линии для посылки сообщения
14	STD	к АОД	Передаваемые данные по вторичной линии
15	TC	к АПД	Синхронизация передаваемого сигнала
16	SRD	к АПД	Принимаемые данные по вторичной линии
17	RC	к АПД	Синхронизация принимаемого сигнала
18		к АОД	Локальное управление
19	SRTS	к АОД	Запрос на посылку сообщения по вторичной линии
20	DTR	к АОД	Готовность терминала получения данных
21	SQ	к АОД/ АПД	Дистанционное управление/детектор качества сигнала
22	RI	к АПД	Сигнальный индикатор
23		к АОД / АПД	Селектор скорости передачи данных
24	TC	к АОД	Синхронизация передаваемого сигнала
25		к АПД	Режим проверки

1. **Данные.** В интерфейсе RS-232 существуют два независимых канала для последовательной передачи данных, один из которых называется первичным, а другой — вторичным. Оба эти канала могут быть использованы для передачи данных в дуплексном режиме.
2. **Управление передачей данных.** Сигналы управления передачей данных используются для контроля потока последовательных данных по каналу связи.
3. **Синхронизация.** Для синхронизации действий необходимо посылать синхросигналы между приемником и передатчиком.

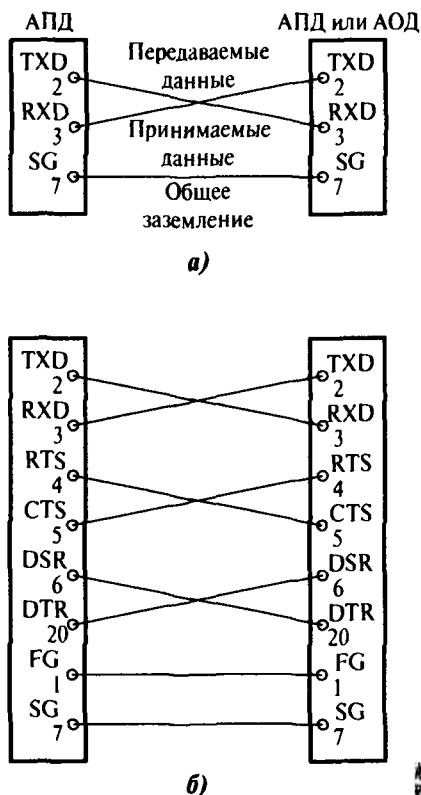


Рис. 24.4. Пример подключения через интерфейс RS-232:

а — минимальное подключение;
б — более сложное подключение

Для простейшей двунаправленной связи требуются только линии 2 и 3 для передаваемых и принимаемых данных и линия сигнальной земли (Рис. 24.4а). Подключение к линиям управления передачей данных (Рис. 24.4б) требуется в более сложных случаях. Аппаратура, подключаемая к сети передачи данных (АПД), способная принимать и передавать сообщения, например компьютер, обычно имеет разъем штыревого типа, а аппаратура, способствующая обмену данными (АОД), например модем, имеет разъем гнездового типа. Данные через интерфейс должны передаваться в соответствующем коде, например ASCII, который является одним из наиболее используемых в компьютерных системах.

Дополнительная литература: Petersen D. (1992), *Audio, Video and Data Telecommunication*, McGraw-Hill; Green D.C. (1991, 1995), *Data Communication*, Longman.

Интерфейс I²C

Интерфейс внутренней связи, называемый также интерфейс I²C, — это шина данных, разработанная фирмой Philips, для соединения между интегральными схемами, расположенными

ми на одной и той же плате, или между периферийным оборудованием, если длина соединительного кабеля невелика. Этот интерфейс позволяет приборам обмениваться данными и командами при помощи только двух проводов. Обе линии являются двунаправленными, одна из них — это линия последовательной передачи данных (SDA), другая — линия синхронизации (SCL). Обе линии подсоединены к положительному полюсу источника питания через резистор (**Рис. 24.5**). Устройство, управляющее обменом по шине данных, является главным, а контролируемое устройство — ведомым. Этот интерфейс используют некоторые микроконтроллеры.

Когда шина свободна, т.е. на ней нет никаких входных сигналов, на обеих линиях SCL и SDA выставлены **ВЫСОКИЕ** уровни сигналов (**Рис. 24.6**). Для начала передачи данных передатчик сбрасывает сигнал на линии SDA, за ним сбрасывается сигнал на линии SCL.

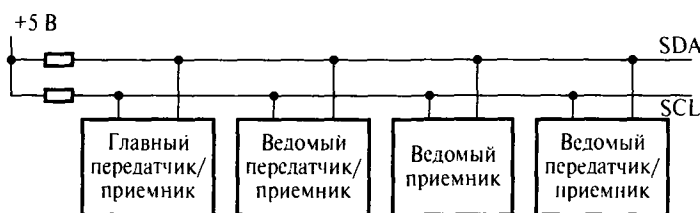


Рис. 24.5. Интерфейс I^2C

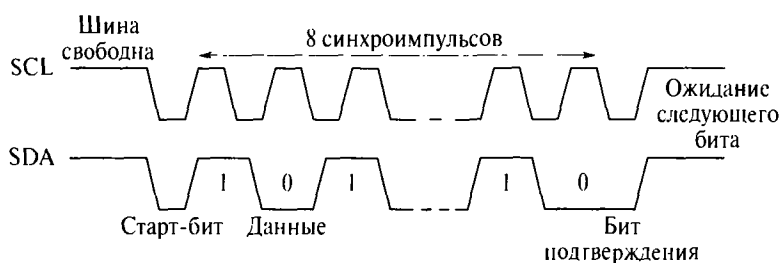


Рис. 24.6. Диаграмма обмена на шине

Это и есть стартовый сигнал, после чего начинается передача данных. Сигнал подтверждения приема означает, что байт данных успешно принят. Приемник поднимает уровень сигнала на линии SCL, следом за ним на линии SDA также устанавливается **ВЫСОКИЙ** уровень. Каждому биту переданных данных соответствует импульс синхронизации на линии SCL; нет никаких ограничений на количество передаваемых байтов данных между условиями начала и окончания обмена; после каждого байта данных приемник посылает сигнал подтверждения в виде девятого бита. После этого может передаваться следующий байт. В конце сообщения устанавливается **ВЫСОКИЙ** уровень

сигнала на линии SCL, следом за ним уровень сигнала на линии SDA тоже становится ВЫСОКИМ; это и есть окончание приема.

Интерфейсы периферийных устройств

Микропроцессорные системы разрабатываются для работы с входными сигналами, имеющими небольшой ток и напряжение порядка нескольких вольт, и они повреждаются, если на их входы и выходы действуют сигналы с более высоким напряжением или током. Такие «опасные» сигналы могут появляться от датчика с цифровым выходом или от аналого-цифрового преобразователя, входящего в состав измерительного блока. Это может привести или к появлению на входе микропроцессора сигналов, уровни которых он не может принять, или к выбросам напряжения в переходных режимах, или к возникновению помех. В свою очередь, для оборудования, работающего под управлением микропроцессора, могут потребоваться сигналы с такими уровнями напряжения и тока, которые не может предоставить микропроцессор. Могут возникнуть также проблемы с разницей в скоростях передачи данных, или могут потребоваться дополнительные линии для управления побайтной передачей данных. Далее описаны способы разрешения подобных проблем.

Электрическая развязка

Из-за проблем, связанных с разными уровнями сигналов по току или напряжению, часто возникает необходимость входы/выходы приборов электрически изолировать от входов/выходов микропроцессора. Для этой цели чаще всего используются *оптроны* или *оптопары*. На Рис. 24.7 показаны принципиальная схема такого устройства и вариант его включения в измерительный контур, где с входной стороны — цифровой вход от чувствительного элемента с соответствующим уровнем сигнала, а на выходе — микропроцессор. Опторон состоит из светоизлучающего диода (СИД), через который течет входной ток. Инфракрасное излучение, испускаемое светодиодом, детектируется фототранзистором, расположенным достаточно близко, но электрически изолировано от него. Таким образом, возникновение импульсов в цепи светодиода приведет к появлению импульсов в цепи фототранзистора, хотя никакого физического соединения между ними не существует.

Выше была рассмотрена одиночная оптопара. Однако интегральные микросхемы в одном корпусе могут содержать два или четыре оптрона. Для характеристики оптрона обычно используется *коэффициент передачи*, который определяется как отношение выходного тока ко входному. Например одиночный оптроны, показанный на Рис. 24.7, может иметь коэффициент передачи, равный 20% при ограничении выходного тока до 7 мА.

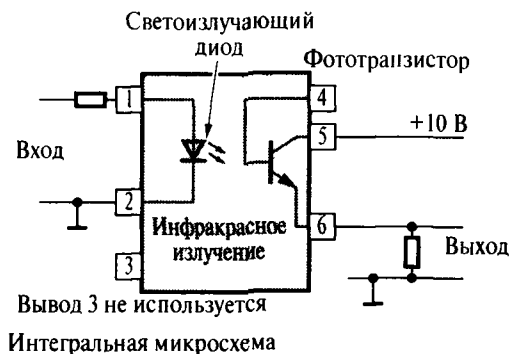


Рис. 24.7. Схема оптрона

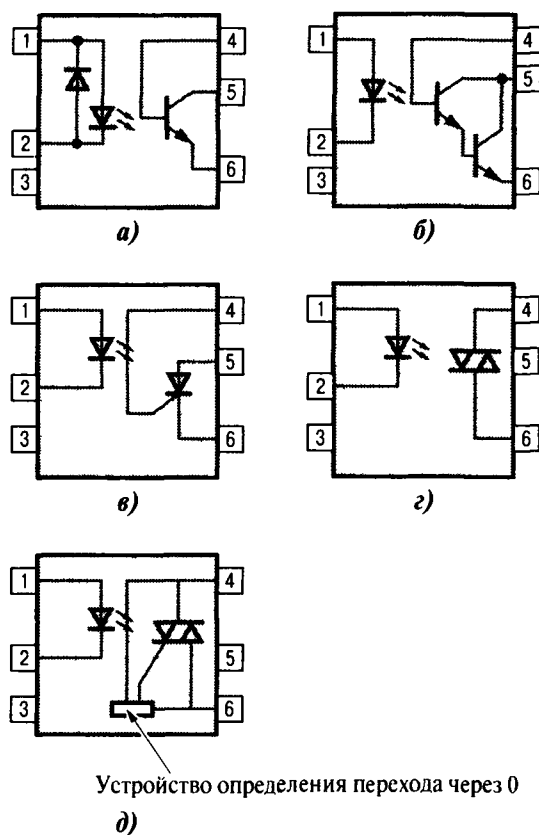


Рис. 24.8. Разные типы оптопар:

- а — со входом переменного тока — на выходе транзистор;
- б — с транзисторным каскадом Дарлингтона;
- в — с кремниевым тиристором; г — с симистором;
- д — с симистором, включающимся в моменты перехода напряжения через ноль

На Рис. 24.8 показаны другие варианты встроенных оптоэлектронных компонентов, разработанных для различных условий работы. Оптопары бывают со встроенными диодами для вы-

прямления тока, которые могут использоваться в цепях переменного тока (**Рис. 24.8а**). Может использоваться каскад Дарлингтона на двух транзисторах (**Рис. 24.8б**) для повышения коэффициента усиления, такая оптопара может иметь коэффициент передачи, равный 300%, и максимальный выходной ток 100 мА. Для управления мощными выходными цепями используются оптопары со встроенными симисторами или кремниевыми тиристорами. Симисторы проводят обе половины периода переменного тока, поэтому могут быть использованы в цепях переменного тока. Оптопара со встроенным симистором может иметь специальное устройство, определяющее момент перехода напряжения через ноль, в этом случае симистор будет включаться только в эти моменты, что значительно уменьшает переходные процессы и предотвращает возникновение электромагнитных помех.

Согласование по питанию

Оптопары могут быть использованы для непосредственного управления цепями маломощной нагрузки без всяких дополнительных цепей. В цепях с высокой мощностью нагрузки они должны использоваться с релейными или транзисторными цепями переключения.

Реле могут быть использованы вместе с оптопарами, когда необходимо их относительно небольшой выходной ток использовать для включения цепей, где протекает гораздо больший ток. Например такая развязка позволяет микропроцессору управлять реле и, следовательно, включать и выключать электродвигатель в цепи нагрузки. Альтернативой для реле является использование транзисторных ключей. На **Рис. 24.9** показана принципиальная схема транзисторного ключа. Транзистор открывается или запирается в зависимости от приложенного напряжения к его базе. Выходной сигнал микропроцессора при помощи такого транзисторного ключа управляет периодическим включением и выключением электродвигателя, тем самым управляя длительностью его работы; средний ток, приложен-

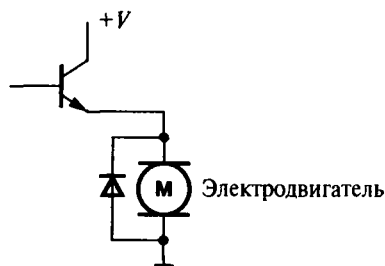


Рис. 24.9. Управление скоростью электродвигателя при помощи транзисторного переключателя

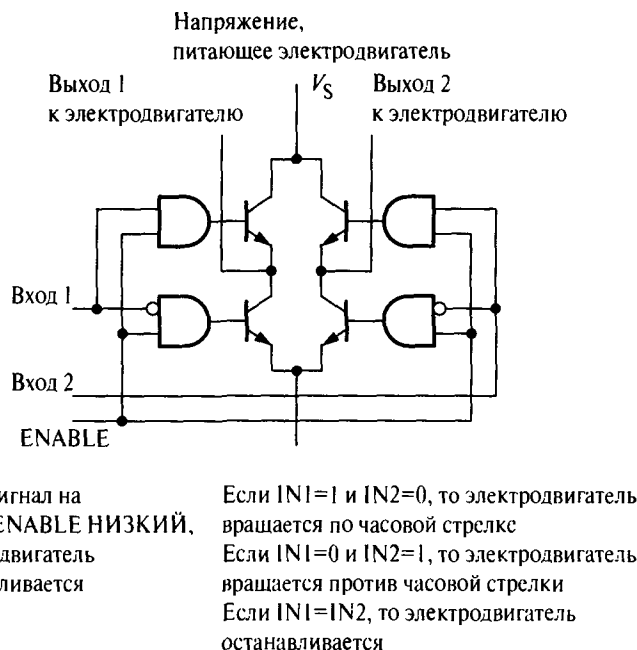


Рис. 24.10. Управление скоростью и направлением вращения электродвигателя

ный к электродвигателю, может также меняться, поэтому возможно управление и скоростью его вращения. Схема, изображенная на **Рис. 24.9**, дает возможность управления вращением электродвигателя только в одном направлении. На **Рис. 24.10** показана схема транзисторного переключения на четырех транзисторах; эта схема дает возможность управления электродвигателем в обоих направлениях (прямом и реверсивном), а также возможность регулировки скорости его вращения в обоих направлениях.

Буферные устройства для согласования сигналов

Если выходной сигнал микропроцессора подсоединен напрямую к базе транзистора, то для переключения транзистора скорее всего потребуется больший ток, чем тот, который выдает микропроцессор. Поэтому и используются буферные устройства, которые поднимают уровень сигнала управления и обеспечивают электроизоляцию цепей. Термин «буферное устройство с тремя состояниями» указывает на то, что выходной сигнал такого буфера может принимать состояние **ВЫСОКОГО** уровня, **НИЗКОГО** уровня, а также состояние, когда буферное устройство ведет себя как разомкнутая цепь. Это высокоимпедансное состояние буферного устройства управляется специальной линией управления. На **Рис. 24.11** показаны обозначения буферов с тремя состояниями и логика их работы.

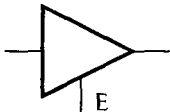
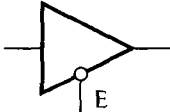
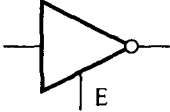
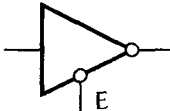
	Сигнал разрешения	Вход	Выход
	0	0	Высокий импеданс
	0	1	Высокий импеданс
	1	0	0
	1	1	1
Неинвертирующее буферное устройство, ВЫСОКИЙ уровень разрешающего сигнала			
	0	0	0
	0	1	1
	1	0	Высокий импеданс
	1	1	Высокий импеданс
Неинвертирующее буферное устройство, НИЗКИЙ уровень разрешающего сигнала			
	0	0	Высокий импеданс
	0	1	Высокий импеданс
	1	0	1
	1	1	0
Инвертирующее буферное устройство, ВЫСОКИЙ уровень разрешающего сигнала			
	0	0	0
	0	1	1
	1	0	Высокий импеданс
	1	1	Высокий импеданс
Инвертирующее буферное устройство, НИЗКИЙ уровень разрешающего сигнала			

Рис. 24.11. Буферные устройства с тремя состояниями

Подключение дисплеев на светоизлучающих диодах

Светоизлучающие диоды (СИД) будут светиться, если через них протекает достаточно большой ток, обычно несколько миллиампер. Семисегментный дисплей содержит семь СИД, расположенных по контуру цифры восемь, для формирования различных цифр, что достигается путем включения соответствующих комбинаций СИД. Семисегментный дисплей требует семь входных сигналов управления. Таким образом, для отображения нужной цифры микропроцессор должен сформировать соответствующее управляющее слово. Это слово передается в триггерное устройство, например 74LS244, которое запоминает его для последующей активизации выбранных СИД (Рис. 24.12). Альтернативный способ — использование специальных устройств для преобразования выходного сигнала микропроцессора в требуемую комбинацию из семи разрядов, одновременно это устройство должно обеспечивать необходимый уровень тока для управления СИД. На Рис. 24.13 показан вариант такой системы, использующей дешифратор 7447.



Рис. 24.12. Система с использованием триггерного устройства

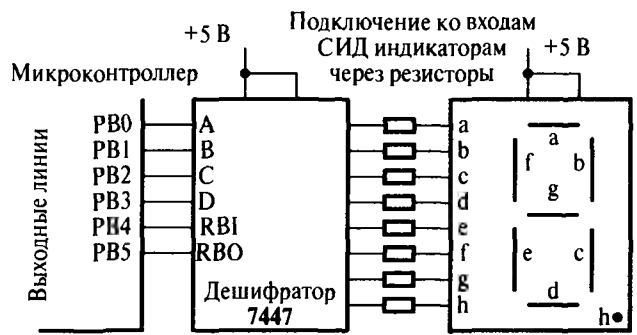


Рис. 24.13. Система с использованием дешифратора

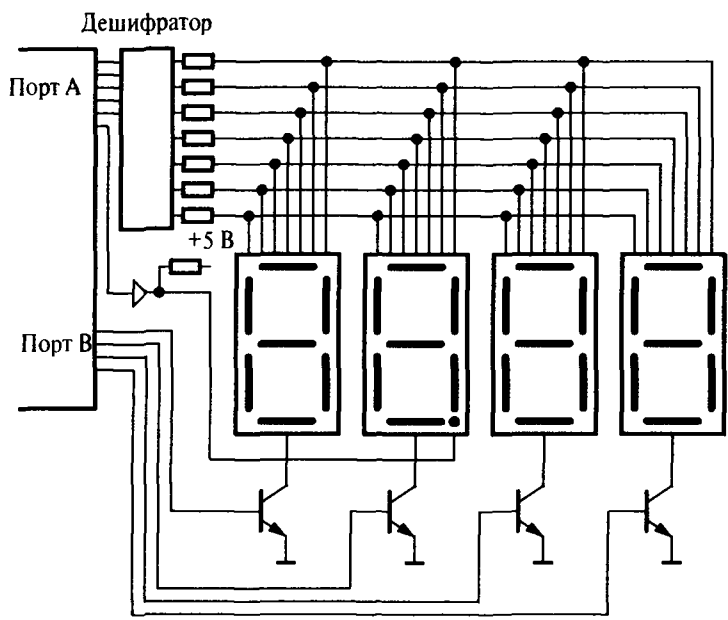


Рис. 24.14. Дисплей на несколько цифр

В дисплеях с несколькими СИД элементами используется одно дешифрирующее устройство с мультиплексором для переключения между элементами. На **Рис. 24.14** показана такая схема. Данные с выходного порта А микроконтроллера поступают на дешифратор, который преобразует их в требуемый вид и передает их на все СИД элементы. Каждый СИД элемент соединен с землей через *n-p-n*-транзистор типа 2N2222. СИД элемент не может загореться, пока не включится соответствующий ему транзистор, который управляется от выходного порта В. Таким образом, переключением линий выходного порта В микроконтроллер управляет зажиганием соответствующих элементов СИД.

Дополнительная литература: Bolton W. (2000), *Microprocessor Systems*, Longman; Stiffler A.K. (1992), *Design with Microprocessors for Mechanical Engineers*, McGraw-Hill; Vears R. (1990), *Microprocessor Interfacing*, Butterworth-Heinemann.

Программируемые интерфейсы

Для параллельных входов и выходов микропроцессоры могут иметь свои входные и выходные интерфейсы, например буферные устройства с тремя выходными состояниями для входов и триггерные «защелки» для выходов. Альтернативой этому является использование **программируемого интерфейса для периферийных устройств (PIA)** (**Рис. 24.15**). Такие интерфейсы включаются непосредственно на шины микропроцессора и имеют два порта ввода/вывода, которые могут быть запрограммированы на разные режимы работы. Порт А, например, может быть запрограммирован на вход, а порт В — на выход, или наоборот. Дальнейший обмен через порты А и В осуществляется под управлением программы.

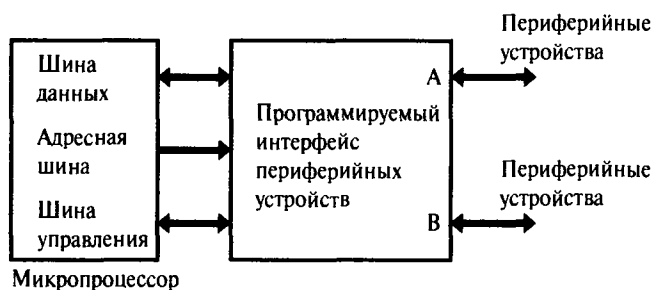


Рис. 24.15. Программируемый интерфейс для периферийных устройств

Дополнительная литература: Bolton W. (2000), *Microprocessor Systems*, Longman; Stiffler A.K. (1992), *Design with Microprocessors for Mechanical Engineers*, McGraw-Hill; Vears R. (1990), *Microprocessor Interfacing*, Butterworth-Heinemann; Green D.C. (1991, 1995), *Data Communication*, Longman; Leventhal L.A. (1978), *Introduction to Microprocessors*, Prentice Hall.

Универсальные асинхронные приемники/передатчики (приемопередатчики)

По входам и выходам микропроцессора осуществляется параллельная передача данных. При параллельной передаче для каждого передаваемого разряда используется отдельная линия. При последовательной передаче для передачи данных требуется только одна линия, а данные передаются в виде последовательности бит. **Универсальный асинхронный приемник/передатчик (UART)** — это программируемый интерфейс, который может быть использован микропроцессором для преобразования последовательных данных в параллельные для входов и параллельных данных в последовательные для выходов (Рис. 24.16).



Рис. 24.16. Универсальный асинхронный приемник/передатчик

Дополнительная литература: Bolton W. (2000), *Microprocessor Systems*, Longman; Stiffler A.K. (1992), *Design with Microprocessors for Mechanical Engineers*, McGraw-Hill; Vears R. (1990), *Microprocessor Interfacing*, Butterworth-Heinemann; Green D.C. (1991, 1995), *Data Communication*, Longman; Leventhal L.A. (1978), *Introduction to Microprocessors*, Prentice Hall.

Входные и выходные интерфейсы микроконтроллеров

Микроконтроллеры имеют параллельные входные/выходные интерфейсы, а также многие из них имеют последовательные входные/выходные интерфейсы. Например микроконтроллер Motorola M68HC11 имеет пять портов, которые могут быть использованы как два параллельных выходных порта, один параллельный входной порт и один порт, который может быть запрограммирован либо как параллельный вход, либо как параллельный выход. Можно также запрограммировать некоторые из выводов этих портов для работы в режиме синхронного последовательного интерфейса и в режиме асинхронного последовательного интерфейса.

Дополнительная литература: Bolton W. (2000), *Microprocessor Systems*, Longman; Calcut D. M., Cowan F. J., Parchizadeh G. H. (1998), *8051 Microcontrollers*, Arnold; Huang H-W. (1996), *MC 68HC11 An Introduction*, West Publishing Company; Stewart J. W., Mia K. X. (1999), *The 8051 Microcontroller*, Prentice Hall.

Предметный указатель

D-оператор для систем второго порядка	37
— — — первого порядка	37
<i>p-i-n</i> -фотодиод	85
Q-метр	236
Автоколлиматор	204
АИМ	128
Аккумулятор	345
АЛУ	344
АМ	128
Амплитудная модуляция	128
Амплитудно-импульсная модуляция	128
Анализ термический	184
— термогравиметрический	184
— электрохимический	172
Аналого-цифровое преобразование	129
Аналого-цифровой преобразователь	129
Анемометр	253
— нагревательный проволочный	65
— постоянной температуры	65
— с нагретой проволочкой	270
АПД	361
Аппаратура передачи данных	361
Ареометр	186
Арифметико-логическое устройство	344
Аттенюатор	123
АЦП	129
— двухстадийного интегрирования	130
— одностадийного интегрирования	131
— последовательного приближения	130
Барометр anerоидный капсульного типа	302
— Фортина	296
Барометры	296
Батарея термоэлектрическая	326
Баярда—Алперта измеритель давления	337
Бел	19
Бит	19
Бойля—Мариотта закон	332
Бурдона манометр	332
Вакуум	332
Ваттметр электронный	224
— — электродинамический	220
— — с компенсационной катушкой	223
Величины электрические	206
Весы неравноплечные	273
— пружинные	275
— равноплечные	273
— электромагнитные компенсационные	274

Вина мост	107
Витая пара	51
Вольтамперметрия по постоянному току	174
— с анодной очисткой	176
Вольтметр с параллельным преобразованием	227
— для измерения переменного напряжения	212
— — — постоянного напряжения	211
— последовательного приближения	227
— с двойным интегрированием	228
— — широтно-импульсной модуляцией	228
— цифровой	227, 229
— электронный	214
— электростатический	226
Воспроизводимость	19
Время отклика	19
— преобразования	131
— реакции	19
— среднее безотказной работы	55
Выпрямитель	120
Гальванометр	137
— магнитоэлектрический светолучевой	210
— светолучевой	210
Гамма-излучение	290
Гаусса распределение	27
Гейгера счетчик	308
Генератор пьезоэлектрический ультразвуковой	85
Гистерезис	19
Датчик	14
— вибрационный	97
— — струнный силы	97
— давления диафрагменный струнный	305
— — дифференциальный	92
— — емкостной диафрагменный	299
— — пьезоэлектрический диафрагменный	306
— — сильфонный	303
— — струнно-вибрационный	305
— давления, проградуированный в единицах силы	277
— деформаций тензометрический	65
— емкостной	69
— — дифференциальный	108
— измерения малых перемещений	75
— индуктивный	71
— — дифференциальный	109
— — перемещений	74
— — угловой скорости вращения вала	73
— магнитный поплавковый	283
— механический	93
— освещенности	68
— плотности жидкости	97
— пневматический	91
— положение оси цифровой	03
— положения оси дискретный	94, 203
— — — цифровой	95
— потенциометрический поплавковый	282

— пьезоэлектрический	.83
— с поплавком на тросике	.281
— скорости потока жидкости или газа	.65
— температуры	.63
— термоэлектрический	.79
— углового положения оси	.78
— упругости	.88
— уровня емкостной	.288
— — резистивный	.287
— — ультразвуковой	.289
— фотоэлектрический	.85
— электрохимический	.87
Датчики	.62
— давления	.92
— деформаций	.315
— положения оси	.203
— сопротивления	.63
Двигатель переменного тока позиционный	.78
Де Сьюти мост	.107
Делитель напряжения	.120
Демпфирование критическое	.33
Детектор газовый	.307
— фотонный	.329
Децибел	.20
Дешифратор	.345
Джохансона экстензометр	.314
Диапазон измерений	.20
Диафрагма	.90
Диск кодирующий	.96
Дискретизация	.129
Дискретность	.130
Дисплей на светоизлучающих диодах	.367
Дисплей алфавитно-цифровой	.157
— жидкокристаллический	.157
Дифференциальный термический анализ	.184
Дозиметр пленочный	.311
— портативный	.308
— термолюминесцентный	.312
Долговечность	.57
Дрейф	.20
— нуля	.20
— чувствительности	.20
Единицы измерений	.17
Жидкостная хроматография	.168
Задержка	.20
Заземление одной точки	.51
Закон экспоненциальный	.58
Запись магнитная	.161
Затухание критическое	.33
Значение истинное	.20
— среднее арифметическое	.26
Значения pH	.88
Зона мертвая	.21
Измерители давления на эффекте закона Бойля—Мариотта	.332

Измерение веса	272
— и силы с использованием элементов упругости	274
— компенсационными методами	274
— рычажными методами	272
— гидродинамическое	243
— давления	292
— по теплопроводности	334
— ионизирующего излучения	307
— — — методами термолюминесценции	312
— — — — фоторегистрации	311
— коэффициента мощности	224
— линейных перемещений времяпролетным методом	201
— — — механическими методами	192
— — — оптическими методами	199
— — — пневматическими методами	196
— — — электрическими методами	197
— мгновенной скорости потока по давлению	268
— — — — термическим методом	270
— напряженных состояний и деформаций	313, 315, 317, 318
— — — методом фотоупругости	318
— переменного напряжения	212, 215
— тока	210
— перемещений	192, 196, 197, 200
— плотности	185
— при помощи датчика гамма-излучений	191
— постоянного напряжения	211, 214
— тока	209
— расхода массового косвенными методами	268
— — — потока жидкости	243
— — — прямыми методами	266
— сил методом гидравлического давления	277
— по давлению	277
— силы	272
— пьезоэлектрическими методами	276
— сопротивлений с помощью вольтметра цифрового	229
— температуры	320
— токов с помощью вольтметра цифрового	229
— угловых перемещений	202, 204
— уровня	278
— — весовыми методами	286
— — визуальными методами	279
— — поплавковыми методами	280
— — пузырьковым методом	286
— — радиационными методами	290
— — термическими методами	291
— — ультразвуковыми методами	289
— — электрическим методом	287
— фазы осциллографическое по фигурам Лиссажу	240
— частоты осциллографическое по фигурам Лиссажу	240
— ЭДС	234
— электрических величин	206
— электропроводности	172
Измерения жидкости в движении	243
— электрические	44

Измерители давления на трубках Бурдона	304
— электронные	214
— электростатические	226
Измеритель	137
— давления	332
— — ионизационный	335
— — Маклауда	333
— — на газоразрядной трубке	335
— — Пенинга	336
— — Пирани	334
— — по высоте столба жидкости	293
— — термисторный	334
— — термопарный	335
— коэффициента мощности электродинамический	224
— магнитоэлектрический	209
— мгновенной скорости потока	268, 269
— расширения	313
— силы с использованием измерительного кольца	275
— термопарный	219
— ферродинамический	217
— цифровой	138
— электродинамический	220
Измерительная система	14
Индикатор аналоговый	136
— цифровой	136
Индикатор уровня крючкообразный	280
— — по электропроводности	287
Индуктосин линейный	198
Интенсивность отказов	56
Интервал квантования	130
Интерфейс	352
— — внутренней связи	361
— параллельный	352
— — IEEE-488	352
— — Центроникс (Centronics)	357
— периферийных устройств	363
— последовательный RS-232	359
— — RS-449	359
— — для соединения интегральных схем (ИС) I^2C	361
— — приборов общего назначения	352
— — фирмы Hewlett Packard	352
— — согласование по питанию	365
— — стандартный	352
— — электрическая развязка	363
Интерфейсы входные и выходные для микроконтроллеров	370
— программируемые	369
— — для периферийных устройств (PIA)	369
Интерференция	50
Источники погрешностей	25
Калибровка	16
Камера ионизационная	307
Капсула	90
Квантование	130
Кельвина мост двойной	230

Код Грея	96
Кодирование	130
Кольцо измерительное	88
Компаратор Джохансона	195
КОСС	53
Коэффициент затухания	33
— ослабления синфазного сигнала	118
— подавления нормального шума	53
— усиления	20
— шума	54
Линеаризация	118
Линейка стальная	192
Линия двунаправленная последовательной передачи данных (SDA)	362
— — синхронизации (SCL)	362
Люминофор	149
Магнитная запись	161
Магнитоэлектрические измерители	137
Маклауда измеритель давления	333
Максвелла – Вина мост	104
— мост	105
Манометр U-образный	293
— Бурдона	332
— мембранный	332
— с U-образной трубкой	332
— — наклонной трубкой	296
— технический	295
Манометры	293
Масс-спектрометрия	182
Масштабирование напряжения	119
— тока	117
— — с использованием шунта	119
Медиана	26
Международная практическая шкала температур	320
Мембрана	90
Метод записи на магнитную ленту «без возврата к нулю»	164
Методы анализа термические	183
— взвешивания рычажные	272
— построения АЦП	131
— химического анализа	166
Микроконтроллеры	346
Микрометр винтовой	192
— с круговой шкалой	194
Микропроцессор основные компоненты	344
Микропроцессорные весы товарные	340
Микропроцессоры в измерительных приборах	340
Микропроцессорный прибор	347
Мода	26
Модем	361
Модуляция амплитудная	128
— амплитудно-импульсная	128
— сигналов переменного тока	128
— — постоянного тока	128
— фазовая	129
— частотная	129

— широтно-импульсная	128
Монитор	155
Мост для измерения больших сопротивлений	231
— переменного тока Вина емкостной сбалансированный	107
— — — Де Сюти емкостной сбалансированный	107
— — — Максвелла индуктивный сбалансированный	105
— — — Максвелла—Вина индуктивный сбалансированный	104
— — — Оуна индуктивный сбалансированный	105
— — — Хея индуктивный сбалансированный	104
— — — Шеринга емкостной сбалансированный	107
— постоянного тока Уитстона неуравновешенный	101
— — — — сбалансированный	99
— — — — скомпенсированный	101
— потенциометрический	109, 233
— — термпарный	111
— — самобалансирующий	111
— трансформаторный	234
— Уитстона	230
Мосты переменного тока	232
— — — сбалансированные	103
— постоянного тока	230
— — — Уитстона	99
МПТС	103
МПУ	99
Мультиметр	213
— электронный	216
Мультиплексор аналоговый	135
Наводка	50
Наводки	50
способы уменьшения	51
— витая пара	51
— дифференциальный усилитель	51
— одна точка заземления	51
— селективный фильтр	51
— электростатическое экранирование	51
взаимные помехи	52
емкостная связь	50
индуктивная связь	50
комбинация емкостных и индуктивных связей	52
плохое заземление системы	50
Надежность	21
— измерительной системы	55
— системы	59
экспоненциальный закон	58
Напряжение смещения	118
Недодемпфирование системы	34
Ненадежность	58
— измерительной системы	55
ОЗУ	343
Омметр магнитоэлектрический	212
Оперативное запоминающее устройство	343
Операционный усилитель	115
— — дифференциальный	117
— — инвертирующий	116

— — интегрирующий	117
— — неинвертирующий	116
Оптопара	363
Ослабитель сигнала	123
Ослабление	123
Основные характеристики плат УСД	349, 350
Осциллограф двухлучевой	153
— с запоминающей ЭЛТ	154
— стробоскопический	154
— электронно-лучевой (однолучевой)	149
Отказ	55
доверительный уровень	56
среднее время безотказной работы	55
— — между отказами	55
Отклонение среднеквадратичное	27
— стандартное	27
Отношение сигнал/шум	21, 51
Оуэна мост	105
Пакеты программ	351
Пенинга измеритель давления ниже атмосферного	336
Передаточная функция	15
Передатчик сигнала	14
Передача данных асинхронная	359
— — дуплексная	359
— — параллельная	344, 352
— — полудуплексная	359
— — последовательная	344, 359
— — симплексная	359
— — синхронная	359
Передемпфирование системы	34
Переключатель транзисторный	365
ПЗУ	342
Пираны измеритель давления	334
Пирометр	327
— двухцветной	330
— радиационный	329
— с исчезающей нитью	328
Пластинки биметаллические	322
Плата УСД	349
Погрешность	21, 25
— вероятная	28
— вносимая вольтметра	45
— — элементов измерительной системы	48
— — измерительной системы	44
— — моста Уитстона	47
— — потенциометра	45
— допустимая	28
источники	25
— квантования	22, 130
— линейности	21
— систематическая	25
— — аппроксимации	25
— — конструкционная	25
— — подключения	26

— старения	25
— случайная	25
— — из-за влияния окружающей среды	25
— — — параллакса	25
— — инструментальная	25
— — стохастическая	25
суммирование	28
Подавление помех	53
Полоса пропускания	22
Полосы муаровые	200
Полярография	174
Помехи	50
интерференция	50
наводка	50
случайный шум	50
— взаимные	52, 19
осреднение	54
подавление	53
Порог чувствительности	22
Постоянная времени	22, 32
Постоянное запоминающее устройство	342
Потенциометр	67
— самобалансирующийся	111
Поток ламинарный	242
— турбулентный	242
Преобразование Лапласа	38
Преобразователи сигнала	98
Преобразователь индуктивный дифференциальный	74
— сигнала	14
Прибор для измерения добротности	236
— программируемый	340
— фотоэмиссионный	86
Приборы второго порядка	33
— непрограммируемые	16
— нулевого порядка	31
— первого порядка	31
— программируемые	16
Приемопередатчик универсальный асинхронный	370
Принтер матричный	159
Программирование микропроцессоров	350
Пьезоэлектрический датчик давления диафрагменный	306
Работоспособность	57
Разброс результатов	26
медиана	26
мода	26
среднее арифметическое значение	26
среднеквадратичное отклонение	27
стандартное отклонение	27
Распределение Гаусса	27
Расходомер	92
— барабанный	258
— времяпролетный	261
— вытеснительного типа	253
— диафрагменный	257

— доплеровский	260
— колебательный	263
— корреляционный	262
— магнитогидродинамический	259
— массовый по методу определения силы Кориолиса	266
— — термический	267
— — турбинно-вибрационный	268
— мишенный	251
— объемный Далла	248
— — поплавкового типа	250
— — сопловой	248
— поршневой	254
— с вращающейся лопастью	253
— — вращающимся импеллером	256
— — закруткой потока	265
— — качающимся диском	255
— — переменным сечением	93
— турбинный	93, 252
— ультразвуковой	260
Расходомеры жидкости массовые по перепаду давления	245
— — объемные по перепаду давления	246
— механические	251
Регистр команд	345
— флагов	345
Регистратор аналоговый	136
— гальванометрический	140
— — прямого считывания	144
— — ультрафиолетовый	146
— двухкоординатный	149
— потенциометрический	147
— с прямой записью	139
— со следящей системой	147
— цифровой	136
Резервирование	60
Ресурс технический	57
Ротаметр	250
Связь дуплексная	359
— емкостная	50
— индуктивная	50
— полудуплексная	359
— симплексная	359
Сельсин	78, 203
Сигма-компаратор	195
Сигнальный процессор	14
Сильфон	90
Синусно-косинусный вращающийся трансформатор	202
Система измерительная	14
— сбора данных	348
Системы пружинные с демпфированием	34
СКВТ	202
Скорость нарастания выходного сигнала	23
Слово	20
— двоичное	20
Смещение	24

Сопротивление добавочное	119
Спектроскопия	176
— атомная эмиссионная	180
— атомно-абсорбционная	180
— инфракрасная	177
— поглощения излучения	176
— флуоресцентная	181
Способность разрешающая	23
Срок службы	57
Стабильность	24
Суммирование погрешностей	28
Схема компенсации температурных воздействий МПТУ	
трехпроводная	102
— — — — — четырехпроводная	102
Сходимость	24
Счетчик Гейгера	308
— команд	345
— пропорциональный	309
— сцинтиляционный	310
Счетчики электроэнергии	225
Тарировка датчиков давления	306
— расходомеров любых типов	271
Тахогенератор индукционный	73
Тензометры	315
Тензорезистор	65
Терминология	19
Термистор	63, 326
Термоанемометр	65
Термометр газовый	324
— жидкостной металлический	323
— — стеклянный	323
— резистивный	325
Термометры на термоэлектрическом эффекте	326
— — эффекте расширения материалов	321
Термопара	79
правило промежуточного металла	83
— промежуточной температуры	79
Термопары	326
Терморезистор	63
Тестер магнитоэлектрический	213
— электронный	216
Технический ресурс	57
Точность	24
— системы	29
Трансформатор	122
— дифференциальный линейно-перестраиваемый	198
— — перестраиваемый	75
— напряжения	122
— синусно-косинусный вращающийся	202
— тока	122
Трубка Бурдона	91
— торсионная	188
— электронно-лучевая	149
Угломер зеркально-линзовый	205

Уитстона мост	99, 230
Указатель стека	345
— уровня	279
Универсальный асинхронный приемопередатчик	370
Уровень доверительный	56
— квантования	130
Усилитель дифференциальный	51
Условие баланса МПТС	104
— — МПТУ	100
Устройство буферное для согласования сигналов	366
— — с тремя состояниями выхода	366
— выборки и хранения	134
— записывающее на магнитной ленте	160
— — — — с прямой записью	161
— — — — — частотной модуляцией	163
— отображения	14, 136
— регистрации данных	351
— сбора данных (УСД)	348
— управления	344
Фазовая модуляция (ФМ)	129
Фильтр активный	127
— пассивный	124
— селективный	51
Фильтрация	125
Флуорометр	181
ФМ	129
Формирователь сигнала	14
Фортина барометр	296
Фотодиод	85
— (<i>p-i-n</i>)	85
— лавинный	85
Фоторезистор	68
Фотоумножитель	86
Фотоэлементы позиционно-чувствительные	199
Функция передаточная	15, 21
— — системы	43
Хабенберга экстензометр	313
Характеристики прибора	31
— — динамические	31
— — статические	31
Хейя мост	105
Холла эффект	83
Хромотография	166
— газовая	169
— жидкостная	168
— на бумаге	166
— тонкослойная	166
ЦАП	132
— многозвенный	133
— суммирующий	133
Центральное процессорное устройство	342
Цифро-аналоговые преобразователи	132
ЦПУ	342
Частота колебаний собственная	33

— опроса	24
Частотная модуляция	129
Частотомеры цифровые	240
Число Рейнольдса	242
ЧМ	129
Чувствительность	24
Чувствительный элемент	14
Шеринга мост	107
ШИМ	128
Шина	343
— адресная	343
— данных	343
— управления	343
Широтно-импульсная модуляция	28
Штангенциркуль нониусный	194
Шум квантования	24, 130
— случайный	50
— — белый	52
— — Джонсона	52
— — дробовой	52
— — из-за дребезга контактов	52
— — мерцаний	52
— — нормальный	53
— — синфазный	53
— — тепловой	52
— — фликкер-шум	52
Шунт	119
Щуп измерительный осциллографа	151
Экранирование электростатическое	51
Экстензометр	313
— Джохансона	314
— Хабенбергера	313
Электроды ион-селективные	87
Электромагнитный датчик давления диафрагменный	299
Электронно-лучевая трубка	149
Электросчетчики ватт-часов	225
Элемент динамометрический	89, 186
ЭЛТ	149
Эталоны	16
— первичные	16
Эффект пьезоэлектрический	83, 276
— — обратный	85
— — прямой	83
Эхолокация	289
Язык высокого уровня Бейсик	350
Ячейка гальваническая	173

Болтон Уильям

**Карманный справочник
инженера-метролога**

Редактор А. Е. Заболотный

Переводчик Ю. А. Заболотная

Художественный редактор М. С. Коршунова

Графика А. Ю. Анненков, А. Н. Клочков

Корректоры С. И. Шишкина, Л. Р. Попова

Технический редактор Е. В. Рудакова

Верстка О. В. Озолс, А. А. Шумилин, Е. М. Илюшина

Выпускающий редактор Е. Е. Граблевская

Издательский дом «Додэка-XXI»

ИД № 02041 от 13.06.2000 г.

105318 Москва, а/я 70

Тел./факс: (095) 366-24-29, 366-81-45

E-mail: books@dodeca.ru; icmarket@dodeca.ru

Подписано в печать 21.04.02. Формат 84×108/32. Бумага типограф. № 2.

Гарнитура «Times New Roman Cyr». Печать офсетная.

Объем 12 п. л. Усл. печ. л. — 20,16. Тираж 5000 экз. Заказ № 2957

Отпечатано с готовых диапозитивов в ОАО «Типография Новости».
107005 Москва, ул. Ф. Энгельса, 46.